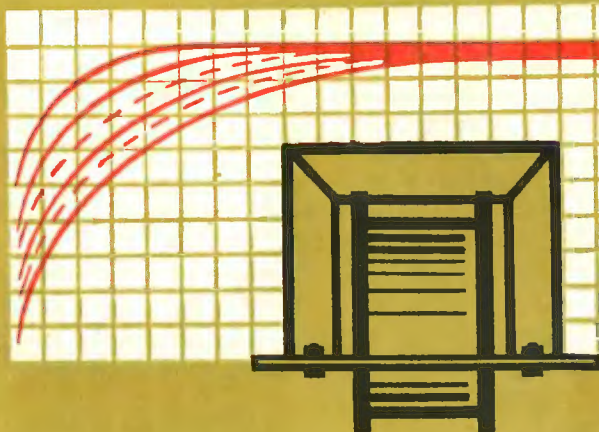


Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА



В.З. НИКИТСКИЙ

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Основные соотношения и расчетные условия в зависимости от назначения трансформатора	5
2. Магнитопроводы	13
3. Электротехнические материалы	34
4. Каркасы, обмотки	49
5. Габаритная мощность, предварительный рас- чет и геометрия трансформатора	56
6. Расчет трансформатора	68
7. Специальные трансформаторы	83
Приложения	92
Список литературы	3-я стр. обл.

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 436

В. З. НИКИТСКИЙ

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Издание второе, переработанное
и дополненное*



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1976

6П2.1.082

Н 62

УДК 621.314.21

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Ларионов В. П.,
Мандрыкин С. А., Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Семенов В. А.,
Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Соколов Б. А., Устинов П. И.

Никитский Владимир Зиновьевич

ТРАНСФОРМАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Редактор А. А. Воскресенский

Гедактор издательства Э. Я. Бранденбургская

Обложка художника В. И. Карпова

Технический редактор Н. Н. Левченко

Корректор И. А. Володяева

Сдано в набор 22/X 1975 г. Подписано к печати 2/II 1976 г.

Г-01885 Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 5,04 Уч.-изд. л. 5,43

Тираж 30 000 экз. Зак. 412 Цена 20 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государствен-
ном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, поли-
графии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Никитский В. З.

Н 62 Трансформаторы малой мощности. Изд. 2-е,
перераб. и доп. М., «Энергия», 1976.

96 с. с ил. (Б-ка электромонтера). Вып. 436.

Во втором, переработанном и дополненном издании книги рас-
сматриваются требования к различным трансформаторам малой мощ-
ности, расчет и возможности их выполнения. Даются рекомендации
по технологии изготовления, рассматриваются вопросы изоляции и
повышения надежности.

Первое издание книги вышло в 1968 г. под названием «Маломощ-
ные силовые трансформаторы».

Книга рассчитана на квалифицированных электромонтеров и мас-
теров, занятых эксплуатацией и ремонтом электрооборудования в ма-
стерских и лабораториях энергосистем.

Н 30311-252
051(01)-76 116-75

6П2.1.082

© Издательство «Энергия», 1976 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В лабораториях и мастерских энергосистем, на многих предприятиях как энергетического, так и не энергетического профиля изготавливаются трансформаторы малой мощности (т. м. м.). При этом часто используются радиолюбительские руководства. Однако технические требования, предъявляемые к т. м. м. в устройствах автоматики, релейной защиты, испытательных и др., могут значительно отличаться от требований, предъявляемых к т. м. м. радиолюбительской аппаратуры.

В последние десятилетия в связи с бурным развитием электроники появилось большое количество т. м. м.: от очень малых до значительных по мощности. Ассортимент электроматериалов (стали, обмоточные провода, изоляционные материалы и др.) увеличивается по номенклатуре и повышается по качеству. Поэтому выбор параметров т. м. м. и полноценное использование электроматериалов должны быть обоснованы (в США за 1965 г. изготовлено т. м. м. до 50 млн. шт. [Л. 1]).

В последнее время для унификации введены междуправительственные и ведомственные нормалы на конфигурацию и размер пластин стали и магнитопроводов, удовлетворяющие большинству требований к т. м. м. В некоторых случаях приходится выполнять специальные т. м. м. с отклонением от нормалы.

С введением нормалей более целесообразно начинать расчет с выбора сечения окна магнитопровода, т. е. размера пластины по нормалю.

В настоящей книге для упрощения расчетов вводятся усредненные значения некоторых параметров, увязанных с размером пластин по нормали [Л. 1], приводится (в несколько упрощенном виде) геометрия трансформатора, рассматриваются на примерах выбор по ориентировочной мощности размера пластины по нормали, расчет допустимой плотности тока, определяются сечение стали, остальные параметры и проводится корректировка их с учетом технических условий.

Автор выражает благодарность доктору техн. наук В. Л. Фабриканту, указавшему на целесообразность начинать расчет т. м. м. с выбора сечения окна магнитопровода и за ряд ценных замечаний, инж. В. Н. Вавину, А. А. Воскресенскому за помощь в компоновке материала.

Замечания и пожелания по брошюре автор просит направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., д. 10, изд-во «Энергия».

Автор

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЗНАЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформаторы малой мощности (т. м. м.) подразделяются на две основные группы. К первой (преобладающей) относятся силовые т. м. м., ко второй — специальные т. м. м., имеющие значительное число модификаций в зависимости от назначения, расчета и исполнения.

Теории силовых трансформаторов мощных и малой мощности не отличаются друг от друга, но расчеты и технология изготовления различны. Ниже рассматриваются в основном силовые т. м. м., в § 7 приводятся некоторые специальные т. м. м., наиболее часто изготавливаемые в энергосистемах, и специфика их расчетов.

Трансформатор предназначен для преобразования напряжения сети в другое большей или меньшей величины. Состоит он из замкнутого магнитопровода и двух обмоток, из которых одна (первичная) включается на напряжение питающей сети, а с другой (вторичной) снимается на нагрузку напряжение требуемой величины (рис. 1). Вторичных обмоток может быть несколько.

При подаче переменного напряжения U_1 на первичную обмотку по ее виткам проходит ток намагничивания, создающий намагничивающую силу (н. с.), которая определяет значение индукции. В обмотках наводится электродвижущая сила (э. д. с.) E (В), пропорциональ-

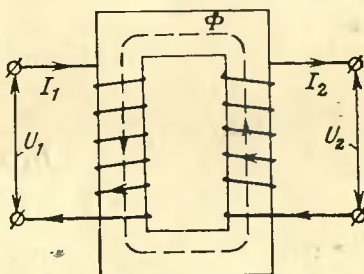


Рис. 1. Принципиальная схема трансформатора.

ная частоте сети f , индукции B , сечению стали S и числу витков ω :

$$E = 4,44f\omega SB, \quad (1)$$

где S —сечение стали магнитопровода, м^2 ; B —максимальное значение индукции, Т ($1\text{Т} = 10^4$ Гс).

Произведение индукции на сечение стали дает значение магнитного потока, Вб:

$$\Phi = BS. \quad (2)$$

Преобразуем выражение (1):

$$\omega S = \frac{E}{4,44fB}. \quad (3)$$

В первичной и вторичной обмотках трансформатора произведения напряжений на свой ток должны быть равны. Но при трансформации неизбежны активные потери в меди обмоток (I^2R) и в стали (на перемагничивание). Поэтому мощность, отдаваемая трансформатором во вторичную сеть, всегда меньше мощности, потребляемой из сети. Отношение вторичной мощности к первичной называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.).

При нормальной работе трансформатора (с нагрузкой) E меньше первичного напряжения U_1 на падение напряжения ΔU в первичной обмотке, но больше U_2 на ΔU вторичной обмотки:

$$U_1 > E > U_2 k_T, \quad (4)$$

где k_T —коэффициент трансформации по числу витков (ω_1/ω_2).

В мощных силовых трансформаторах ΔU по отношению к U_1 ничтожно мало и $U_1 \approx E$. В этих трансформаторах $\cos \phi$ нагрузки изменяется в ограниченных пределах в отличие от силовых т. м. м.

Силовые т. м. м. могут работать при различных видах нагрузки — активной, индуктивной, емкостной, смешанной. Кроме того, с уменьшением мощности т. м. м. может значительно повыситься ΔU . Это в большой степени отражается на их расчете. Учитывать все возможные варианты практически невозможно, да и не нужно. В некоторых случаях может быть введена соответствующая корректировка. Коэффициент полезного действия определяется по активной нагрузке, поэтому т. м. м. обычно рассчитываются по активной нагрузке, что зна-

чительно упрощает их расчет, обеспечивая достаточную точность. Для специальных т. м. м. в ряде случаев расчет возможно вести лишь по условной мощности (§ 7).

Мощность трансформатора определяется произведением напряжения на ток $P=UI$. Сечение провода (при принятой плотности тока, А/мм²) определяет допустимую величину тока. Сечение стали и число витков определяют величину напряжения. В окне магнитопровода должны поместиться первичная и вторичная обмотки. Мощность вторичной обмотки меньше первичной из учета к. п. д. (η_t). Суммарная мощность, пропускаемая обеими обмотками, составит

$$P_1 + P_2 = P_1(1 + \eta_t) \approx U_1 I_1(1 + \eta_t). \quad (5)$$

Индукция и потери в стали магнитопровода. Намагничивающая сила (н. с.) определяет величину индукции B . Измеряется н. с. в амперах, что выполняется с достаточной точностью для магнитопровода по замеру тока намагничивания I_0 , умноженному на число витков ($I_0 w$). При малых изменениях индукции в небольшом перепаде имеется некоторая пропорциональность индукции и тока I_0 . С увеличением индукции ток I_0 возрастает более интенсивно и с определенного значения индукции величина тока резко увеличивается. Это значение индукции называется *индукцией насыщения*.

Ток I_0 состоит из реактивной и активной составляющих. Реактивная составляющая создает магнитный поток Φ , активная определяется активными потерями в стали и как следствие приводит к нагреву стали. Значения тока I_0 , индукции, активных потерь в стали зависят от марки стали и ее термической обработки, а также от конструкции магнитопровода. Заводы указывают удельные потери в стали, определяемые в ваттах на килограмм массы стали для нескольких значений индукции.

В соответствии с Международной системой единиц (СИ) длина измеряется в метрах (м), напряженность— в амперах на метр (А/м), плотность тока— в амперах на метр в квадрате (А/м²). Практически для т. м. м. удобнее применять дробные единицы измерений (А/см, А/мм²).

Основные расчетные выражения. В выражениях (1)—(3) приняты единицы измерений и обозначений по системе СИ. В тексте значения индукции даются

в теслах (Тл), измерения длины приняты в дробных единицах.

Для получения основных расчетных зависимостей преобразуем выражение (3): умножим его правую часть на 10^4 для перевода сечения стали в квадратные сантиметры, поскольку размеры магнитопровода замеряются в сантиметрах, разделим выражение на коэффициент заполнения стали $k_c = 0,9$, что близко к действительным значениям (окалина, лаковое покрытие), и получим:

$$\omega S_c = \frac{10^4 E}{4fB}, \quad (6)$$

где S_c —геометрическое сечение магнитопровода, см².

Затем выражение (6) умножим на $I(1 + \eta_T)$ и заменим E на U_1 . Получим слева число витков первичной и вторичной обмоток, справа—мощность обеих обмоток. Разделим полученное на плотность тока (А/мм²), получим в левой части значение сечения меди обмоток S_M .

Обозначим отношение сечения меди к размеру окна коэффициентом

$$k_M = \frac{S_M}{10^2 S_o}.$$

Множитель 10^2 введен в знаменатель, поскольку сечение меди выражается в квадратных миллиметрах, а размер окна—в квадратных сантиметрах.

Разделим полученное выражение на k_M и получим S_o :

$$S_o S_c = \frac{10^2 P_1 (1 + \eta_T)}{4fBk_M \Delta}. \quad (7)$$

Подставим значение частоты $f = 50$ Гц

$$S_o S_c = \frac{P (1 + \eta_T)}{2Bk_M \Delta}. \quad (8)$$

В отличие от мощных трансформаторов, изготавливаемых на частоту 50 Гц, т. м. м. во многих случаях изготавливаются на повышенные частоты, их расчет выполняется по выражению (7), т. м. м. на 50 Гц рассчитываются по (8).

Для дальнейшего расчета потребуются дополнительные равенства. Их выражения (6) заменой частоты ее

значением 50 Гц получаем:

$$\left. \begin{aligned} \omega S_c &= \frac{10^2 E}{2B}; \\ B &= \frac{50}{\omega S_c} E. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Разделим обе части равенств на E и обозначим через ω_0 число витков, приходящихся на 1 В:

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 S_c &= \frac{50}{B}; \\ B &= \frac{50}{\omega_0 S_c}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Краткий обзор технических требований к т. м. м. Наиболее распространены силовые т. м. м. (из бытовых) в радиоприемниках, телевизорах. Они включаются и работают с нагрузкой, близкой к номинальной. Аналогичны условия работы силовых т. м. м. в различных устройствах и приборах. Поэтому безразлично, какие потери преобладают в стали или меди. В лабораторной аппаратуре, в особенности предназначенной для разъездной работы (испытаний и наладок), основным требованием является снижение объема и массы. При этом снижение объема обычно более существенно, так как в ряде случаев это позволяет снизить размеры и массу всего устройства; к. ш. д. для этих устройств, как правило, значения не имеет.

При работе силового т. м. м. с постоянной нагрузкой падение напряжения в обмотках компенсируют изменением чисел витков обмоток, при этом уменьшают число витков первичной обмотки и увеличивают число витков вторичной обмотки на процент падения напряжения в каждой обмотке.

В устройствах автоматики, релейной защиты, телемеханики т. м. м. могут работать с переменной нагрузкой и длительно оставаться без нагрузки. При этом компенсация падения напряжения ΔU не выполнима. Для улучшения нагрузочной характеристики, т. е. уменьшения колебания вторичного напряжения с изменением нагрузки, следует уменьшать массу меди и плотность тока. Это возможно за счет увеличения массы стали (потери в стали) и увеличения тока I_0 , что не всегда допустимо. В некоторых случаях величина тока I_0 имеет решающее значение.

Рассмотрим силовой т. м. м., предназначенный для холодильника, электродвигатель которого работает не более 15—20% всего времени, а остальное время электроэнергия расходуется на потери в стали. При расчете надо значительно снизить индукцию и потери в стали на холостом ходу $I_{х.х}$ ($U_1 E$). В качестве таких трансформаторов м. м. применяются обычно автотрансформаторы, имеющие по отношению к т. м. м. пониженные потери в меди. Можно применить автотрансформатор с несколько пониженной мощностью (учитывая кратковременный режим), но с пониженной индукцией. Нагрузочная характеристика для него не имеет значения.

Требования одновременного снижения объема и массы до некоторой степени однозначны, одновременного снижения ΔU и тока I_0 противоречивы. При расчетах т. м. м., особенно специальных, надо выделять основные и второстепенные требования, так как выполнение различных, иногда противоречивых требований не всегда возможно.

В последующем тексте рассматриваются наиболее характерные общие требования к т. м. м., по второстепенным, редко встречающимся т. м. м., даются краткие рекомендации.

Вопросы надежности. В зависимости от области применения требования надежности т. м. м. различны. Добиваться максимально возможной надежности во всех случаях нецелесообразно, так как при этом значительно повышается стоимость изделия. Возникает понятие *стоимости надежности*. В ряде случаев значительно экономичнее повысить ремонтпригодность и ввести гарантийный ремонт.

Иногда повышение надежности приводит к увеличению размеров и массы, что ограничивает возможности применения различных испытательных устройств при развездной работе.

Иное положение с т. м. м. и аппаратурой, предназначенными для ответственных устройств, как, например, в железнодорожной автоблокировке, авиации, в автоматике энергосистем, где выход из строя одного из элементов этих устройств может привести к аварии. В этих устройствах ремонтпригодность является лишь второстепенным требованием, основным является *безотказность*.

Остановимся на аппаратуре, применяемой в энергосистемах для целей автоматики (телеизмерений, сигнализации и управления) и в релейной защите. В основном эта аппаратура изготавливается на специализированных заводах, но часто приходится выполнять ее ремонт и переделку под требуемые параметры в условиях эксплуатации, а также устранять замеченные дефекты.

Кроме того, в крупных энергосистемах систематически проводятся для ответственных объектов новые разработки силами лабораторий энергосистем. Производственные возможности и применяемая технология в мастерских разных энергосистем различны, но даже в лучшем случае уступают заводским условиям.

Мастерскими при энергосистемах производятся ремонт и изготовление разной аппаратуры, не изготавливаемой заводами (мелкосерийной), в том числе т. м. м. различной мощности: от т. м. м. с сечением стали менее 1 см^2 (в схемах телеизмерений) до т. м. м. с выходной мощностью до $1\text{—}2 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ и более, так называемых нагрузочных (для испытания аппаратуры при больших токах).

При их изготовлении необходимо учитывать местные и климатические условия работы т. м. м. Так, при установке т. м. м. в сырых помещениях (котельные, насосные), особенно при наличии активных газов, предъявляются требования выбора соответствующей изоляции и применения влагозащитных пропиток и покрытий для снижения влияния токов утечки на изоляцию. В машинных помещениях необходимо учитывать вибрацию. В испытательных устройствах, предназначенных для разъездных работ, необходимо при минимальной массе обеспечить механическую прочность. Трансформатор в испытательном устройстве обычно является наиболее тяжелым узлом, его крепление должно быть достаточно продумано. Основными требованиями надежности к большинству подобной аппаратуры являются ремонтпригодность и взаимозаменяемость, т. е. возможность замены любого элемента в устройстве при минимальном снятии других элементов (для замены из резерва).

При предъявлении к аппаратуре требований безотказности необходимо в месте установки данной аппаратуры учитывать колебания температуры годовой, суточной, наличие химических и других реагентов, разрушающих изоляцию и приводящих к коррозии. На т. м. м.,

встроенных в какое-либо устройство, не следует устанавливать переходных клеммников, надо выводить провода обмотки для непосредственного соединения с соответствующей деталью устройства. Каждое лишнее винтовое соединение является элементом, снижающим надежность.

Оценка необходимой надежности аппаратуры, а также разработка мероприятий для повышения технического уровня изделий являются задачами служб надеж-

Таблица 1

Уровень надежности	Условное обозначение	Опасность отказов, % на 1000 ч	Примечание
Рыночный уровень	0	20	Элементы данного уровня применяются для изделий общего пользования, не требующих количественной оценки надежности
Низкий уровень	R	1,5	Элементы данного уровня применяются для изделий неотвеченного назначения, которые должны иметь количественную оценку надежности
Стандартный военный уровень	S	0,5	—
Разгруженный стандартный уровень	DS	0,15	К этому уровню относятся элементы уровня S, повышение надежности которых достигнуто за счет их использования в режимах ниже номинальных
Верхний уровень	T	0,05	—
Разгруженный верхний уровень	DT	0,01	Повышение надежности элементов T достигается за счет их использования в разгруженных режимах работы
Высший уровень	U	0,005	—

ности, создаваемых на производстве, в конструкторских бюро и научно-исследовательских институтах. В настоящее время количество служб надежности достигает многих тысяч. Там, где такие службы работают эффективно, они оказывают существенную помощь в борьбе за повышение технического уровня изделий, их надежности и долговечности [Л. 11].

Существующая в энергосистемах аварийная разгрузка по частоте базируется на оценке требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей и лишь косвенно определяет уровень надежности аппаратуры и отдельных элементов этой разгрузки. Поэтому представляет интерес оценка уровня надежности по элементам, рекомендованная для электронной аппаратуры фирмой RCA [Л. 10], согласно которой уровень надежности элементов определяется по числу отказов за 1000 ч работы в процентах к числу элементов (табл. 1). Показательно, что фирма к высшему уровню относит электронные вычислительные машины, что естественно, поскольку они включают десятки тысяч (до сотни тысяч) отдельных элементов. Для получения столь высокой надежности требуется очень тщательный отбор деталей и элементов.

О необходимости тщательной отбраковки и отбора деталей сказано в [Л. 7], где отмечается, что иногда из всего брака, приходящегося на сборочный процесс электронной аппаратуры, 75% отказов происходит из-за покупных комплектирующих элементов, последнее, безусловно, определяется низким рыночным уровнем надежности деталей.

2. МАГНИТОПРОВОДЫ

Магнитопроводы трансформаторов низкой частоты (50 Гц) выполняются обычно из листовой электротехнической стали, содержащей от 0,5 до 5% кремния (Si), до 1% углерода (C), остальное — железо (Fe).

Марки сталей (ГОСТ 802-58) обозначают буквой Э. Первая цифра указывает на средний процент кремния; вторая — характеризует электромагнитные свойства: 1 — потери обычные, 2 — пониженные, 3 — низкие, 4 — нормальные при 400 Гц, 5,6 — с повышенной проницаемостью в слабых полях (менее 0,01 А/см), 7,8 — то же в средних полях (от 0,03 до 10 А/см). Третья цифра (0) указывает, что сталь холоднокатаная текстурованная; третья и четвертая (00) — сталь холоднокатаная малотекстурованная. Буква А после цифр обозначает особо низкие удельные потери. Для стали повышенной точности проката и отделки поверхности в конце вводится буква П.

Холоднокатаные стали марок Э310—Э380 помимо кремния (3—3,25%) и углерода (0,0003%) содержат серу (0,003%), марганец и фосфор (менее 0,1%).

Холоднокатаные стали марок (Э31100—Э3200) уступают по своим параметрам сталям марок (Э310—Э320). Их данные не приводятся, так как для т. м. м. они не применяются.

Заводы-изготовители указывают для выпускаемых марок стали зависимость индукции от напряженности магнитного поля H , а также активные потери в стали (Вт/кг) при некоторых значениях индукции (в соответствии с требованиями ГОСТ).

Активная составляющая тока намагничивания I_0 состоит из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Потери на гистерезис—это работа, затрачиваемая на перемагничивание стали. Вихревыми токами называются токи, возникающие в сечении пластин стали под действием э. д. с., наводимой магнитным потоком (в плоскостях, перпендикулярных направлению потока). Эти токи приводят к потерям.

Рассмотрим влияние толщины пластин, частоты сети и других факторов на эти потери. Потери на гистерезис определяются работой, затрачиваемой на один цикл перемагничивания (до заданной индукции) единицы объема или массы стали (независимо от толщины пластин). При отнесении к единице времени (1 с) потери на гистерезис увеличиваются пропорционально частоте; э. д. с., наводимая магнитным потоком, и вихревые токи с уменьшением толщины пластин пропорционально уменьшаются, их произведение уменьшается в квадрате, но при этом увеличивается число пластин, т. е. потери снижаются линейно. С увеличением частоты повышаются э. д. с. и ток. Следовательно, потери на вихревые токи пропорциональны толщине пластин и квадрату частоты.

Потери на вихревые токи рассматривались в пределах пластин стали. Однако они могут замыкаться и в толще магнитопровода через контактирующие поверхности пластин. При этом э. д. с. пластин суммируются, увеличиваются потери в магнитопроводе. Кроме того, наводимые токи создают свой встречный поток, размагничивающий основной магнитный поток. Поэтому пластины стали изолируются. На величину вихревых токов и потерь влияет также омическое сопротивление стали, которое с увеличением содержания кремния увеличивает

ется. При этом снижаются потери в стали. Полные потери можно считать в пределах рабочих индукций примерно пропорциональными квадрату индукции (при 50 Гц).

Надо иметь в виду, что с уменьшением толщины пластин (при последующих прокатах) сталь уплотняется и потери на гистерезис повышаются. Снижается коэффициент k_c . Для расчетов принимается $k_c = 0,9$ (неизменным), поскольку его отклонение значительно меньше допусков в параметрах стали, регламентируемых по ГОСТ.

По толщине пластин стали для каждой частоты и марки стали имеется определенный оптимум, отклонения от которого в сторону увеличения или уменьшения толщины пластин приводят к увеличению потерь. Рекомендуемая толщина указана ниже.

В табл. 2 приведены марки электротехнических ста-

Таблица 2

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, при В, Т, не более			Индукция В, Т, при 300 А/см, не менее
		1,0	1,5	1,7	
Э11	0,5	3,3	7,7	—	2,0
Э12	0,5	3,1	7,1	—	1,98
Э13	0,5	2,8	6,5	—	1,98
Э21	0,5	2,5	6,1	—	1,95
Э22	0,5	2,2	5,3	—	1,95
Э31	0,5	2,0	4,4	—	1,94
Э32	0,5	1,8	3,9	—	1,92
Э31	0,35	1,6	3,6	—	1,92
Э32	0,35	1,4	3,2	—	1,92
Э41	0,5	1,55	3,5	—	1,90
Э42	0,5	1,4	3,1	—	1,89
Э43	0,5	1,25	2,9	—	1,89
Э43А	0,5	1,15	2,7	—	1,89
Э41	0,35	1,35	3,0	—	1,90
Э42	0,35	1,2	2,8	—	1,89
Э43	0,35	1,05	2,5	—	1,89
Э43А	0,35	0,9	2,2	—	1,89
Э310	0,5	1,1	2,45	3,2	1,98
Э320	0,5	0,95	2,1	2,8	2,0
Э330	0,5	0,8	1,75	2,5	2,0
Э310	0,35	0,8	1,75	2,5	1,98
Э320	0,35	0,7	1,5	2,2	2,0
Э330	0,35	0,6	1,3	1,9	2,0
Э330А	0,35	0,5	1,1	1,6	2,0

лей для частоты 50 Гц, дана их толщина и активные потери (Вт/кг).

В изделиях ширпотреба применяются листы сталей толщиной 0,5; 0,35 мм марок Э11—Э42, иногда Э310. В радиоприемной аппаратуре для силовых т. м. м., дросселей, трансформаторов кадровой развертки в телевизорах применяют в основном марки Э42 (иногда Э43). Э310, Э320 толщиной листа 0,35 мм (реже 0,5 мм). Для т. м. м., работающих в основном при постоянном значении питающего напряжения (некоторые специальные и силовые), целесообразно применять указанные выше марки стали и дополнительно марки Э43, Э43А, Э330А. Последние рекомендуются и для силовых т. м. м. при малых размерах магнитопровода.

Листы сталей на повышенные частоты выпускаются толщиной 0,35, 0,2, 0,15, 0,1 мм и тоньше. При частотах до 400 Гц применяют марки Э44, Э340, толщина которых приведена в табл. 3. При частоте 200 Гц применяют

Таблица 3

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг, при B, T , не более		Удельное сопротивление, Ом·мм ² /м, не менее
		0,75	1,0	
Э44	0,35	10,7	19	0,57
Э44	0,20	7,2	12,5	0,57
Э44	0,10	6	10,5	0,57
Э340	0,20	7	12	0,47

листы толщиной 0,35; 0,2 мм; при 400 Гц—0,35; 0,2; 0,15 мм (рекомендуется 0,2 мм), при 1000 Гц—0,1; 0,08 мм. Эти стали применяют также в трансформаторах усилителей звуковых частот (0,35; 0,2 мм). В приложении 9 приведены параметры ленточной стали с нижними пределами толщины 0,08, 0,05 мм.

При частотах 1000 Гц и выше применяются обычно магнитно-мягкие материалы типа пермаллоя.

Выше не упоминались марки сталей Э45—Э48, Э370, Э380. Для силовых т. м. м. они обычно не применяются. В основном они предназначены для специальных т. м. м., работающих в широком диапазоне индукции.

Потери н. с. в стыках магнитопровода. Магнитная проницаемость стали определяется отношением индукции B к напряженности стали H ($\mu = B/H$). Магнитная проницаемость в большой степени зависит от

индукции. Построение зависимости $\mu = f(B)$ выполняется по характеристике стали $B = f(H)$, снятой на магнитопроводе, имеющем одинаковое магнитное сопротивление по всей длине магнитной линии.

Магнитопроводом, удовлетворяющим этому требованию, является кольцевой магнитопровод (тороид). Небольшие тороиды широко применяются в схемах автоматики, где они выполняются наборными из штампованных колец листовой стали или витыми из ленты соответствующей марки стали (витые или ленточные,

Рис. 2. Кольцевые магнитопроводы (тороиды).

а — наборный из штампованных колец; *б* — витой или ленточный типа ОЛ.

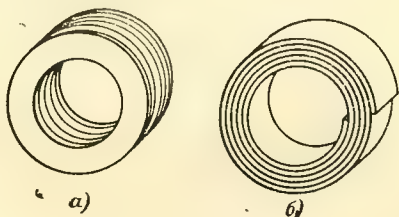


рис. 2). Напряженность такого магнитопровода не зависит от длины магнитной линии и соответствует исходным свойствам магнитного материала.

В ГОСТ 802-58, п. 40, Примечание, дается напряженность H по амплитуде. При замере в действующих значениях обычно приводят

$$\mu = \frac{B}{\sqrt{2}H}.$$

При искаженной форме кривой тока

$$\mu = \frac{B}{K_a H},$$

где K_a — коэффициент амплитуды тока, достигающий в некоторых специальных т. м. м. значений 1,8—2 и более.

Ленточные магнитопроводы с длиной магнитной линии от 0,4 до 1,5 м нашли широкое применение при изготовлении трансформаторов тока в установках высокого напряжения. Для напряжений 6 и 10 кВ эти трансформаторы выполняются как ленточными, так и наборными из штампованных Г-образных пластин, которые собираются так, чтобы зазоры чередовались со сплошными пластинами (вперекрышку). Так как каждая пластина имеет по два зазора, то на пути магнитного потока будет четыре стыка. Часть магнитного потока проходит через зазор, часть переходит по плоскости соприкоснове-

ния в соседние пластины. При этом поток в сквозных пластинах на участке перехода увеличивается, что приводит к увеличению активных потерь в стыках и значительному увеличению тока намагничивания I_0 .

Ориентировочную оценку повышения напряженности H , вызываемой наличием стыков, дает сравнение характеристик $B=f(H)$, снятых до значительных кратностей

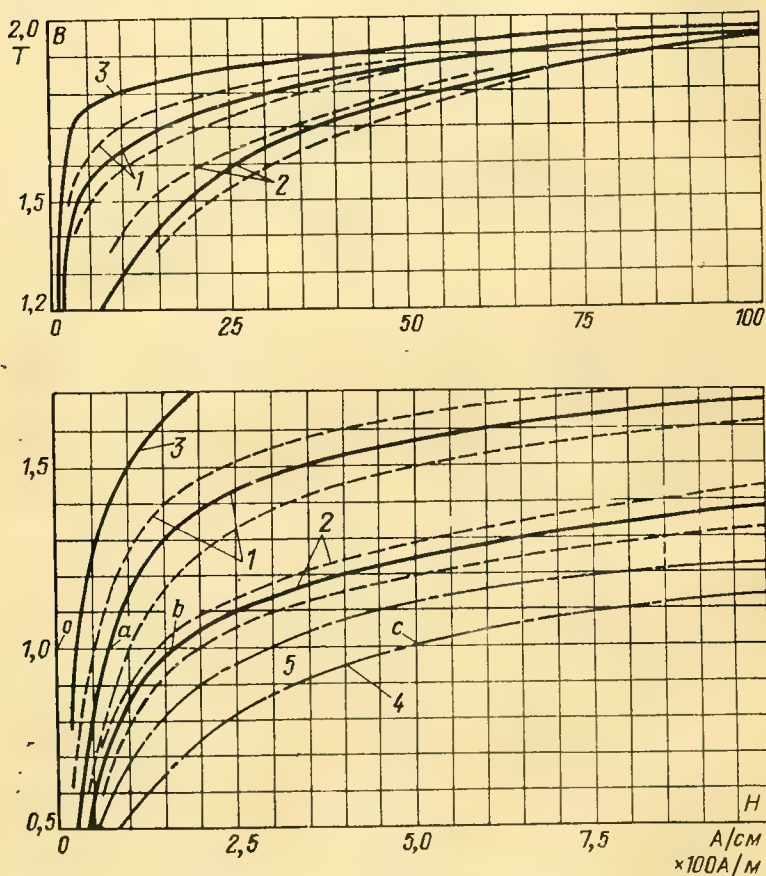


Рис. 3. Заводские характеристики магнитопроводов.

1 — магнитопровод ленточный типа ОЛ, сталь марок Э41, Э42; 2 — наборный из штампованных Г-образных пластин, сталь марок Э41, Э42, Э45, Э46, Э47, Э48 с длиной магнитной линии 45 см; 3 — ленточный типа ОЛ, сталь марки Э310; 4 — с длиной магнитной линии $l_c=9$ см (с четырьмя стыками), сталь марок Э41, Э42; 5 — то же, $l_c=18$ см; — — — допустимый разброс характеристик 1 и 2; - · - · - · — кривые 4 и 5 пересчитаны по кривым 1 и 2.

(до 100 А/см) на ленточном и наборном магнитопроводах (рис. 3) [Л. 3].

Поскольку сопротивление стыков определяется повышенным значением индукции в сталях, а при предельных индукциях характеристики сталей различных марок сближаются, потери в стыках мало зависят от качества стали. Сопротивление стыков также почти не зависит от длины магнитной линии и входит как постоянный и весьма значительный компонент, определяемый индукцией и количеством стыков.

При уменьшении длины магнитной линии сопротивление стыков по отношению к единице длины магнитной линии увеличивается пропорционально ее уменьшению. Поэтому при уменьшении длины магнитной линии в n раз для каждого значения индукции разность между напряженностями кривых 2 и 1 увеличится в n раз.

Например, построим кривую $B=f(H)$ для магнитопровода с длиной магнитной линии 9 см, имеющего четыре участка повышенного сопротивления. Магнитопровод (кривая 2) имеет длину $l_c=45$ см, следовательно,

$$n=45/9=5.$$

Проведем построение графически. При индукции $B=1,0$ Т отрезок ab , увеличенный в 5 раз, соответствует отрезку ac , точка c на кривой 4 соответствует напряженности $H=5$ А/см. Аналогично находим точки для других значений B . Так же можно получить кривую при длине $l_c=18$ см (кривая 5). Этот расчет ориентировочен, стали имеют большие допуски, заводские характеристики приближены.

Выше дано определение магнитной проницаемости стали $\mu=B/H$ по характеристике $B=f(H)$ ленточного магнитопровода. Но магнитопроводы из штампованных пластины имеют по четыре стыка.

Имеются рекомендации [Л. 1] для магнитопроводов, имеющих стыки или зазоры, применять условную эквивалентную проводимость μ_a . При этом напряженность следует обозначать H_a , поскольку включают также потери н. с. в стыках. Более целесообразно принять отношение μ_a к μ стали при одинаковой индукции $\mu_a/\mu=H/H_a$.

Обозначим это отношение коэффициентом k_μ :

$$H/H_a=k_\mu. \quad (11)$$

Коэффициент k_μ характеризует степень использования стали. Обратное значение $1/k_\mu$ соответствует кратности напряженности H_a по отношению к H стали. Поскольку в выражении (11) введены только напряженности, то по коэффициенту k_μ можно оценить снижение параметров стали за счет стыков характеристик, приведенных на рис. 3. Определим значения коэффициента k_μ для магнитопроводов, соответствующих кривым 2 и 4. Индукцию примем $B=1,0$ Т. По выражению (11) для кривой 2 $k_\mu=H/H_2$, $H=0,7$ А/см, $H_2=$

$\approx 1,7$ А/см, $k_\mu = 0,7/1,7 = 0,42$, $1/k_\mu = 2,4$; для кривой 4 $k_\mu = H/H_4$, $H_4 = 5$ А/см, $k_\mu = 0,7/5 = 0,14$, $1/k_\mu = 7,1$.

Индексы приняты цифровые по номерам кривых. Напряженность стали H без индекса (кривая 1, ленточный магнитопровод).

Аналогично определяются значения коэффициента k_μ для других значений индукций.

На рис. 4 приведено примерное соотношение магнитной проницаемости. При начальных индукциях k_μ близок к единице. С увеличением индукции (в пределах рабочих) k_μ значительно увеличивается.

По коэффициенту k_μ не только определять снижение параметров стали по отношению к магнитной проницаемости сталей, но сравнивать два магнитопровода разных размеров, имеющих стыки, для оценки снижения параметров стали с меньшим размером. Например, по кривым на рис. 3 $k_\mu = H_2/H_4$; при $B = 1,0$ Т $k_\mu = 1,7/5 = 0,34$. Некоторые магнитопроводы имеют по два стыка (а не по четыре).

Штампованные пластины для магнитопроводов. Большинство т. м. м. выполняются двух

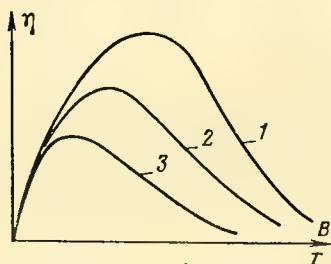


Рис. 4. Магнитная проницаемость магнитопроводов.

1 — μ стали; 2 — μ_r набора из пластин стали; 3 — μ_r то же, но с уменьшенной длиной l_c .

типов (рис. 5): броневого БТ, собранный на пластинах типа Ш, и стержневой СТ, собранный на пластинах П и Г; т. м. м. СТ имеет обмотки, расположенные на обоих стержнях (двухкаркасный) и СТ1 с обмоткой на одном стержне (однокаркасный).

У БТ средний стержень d является основным. На нем помещается обмотка (обычно на каркасе). Остальные размеры: b — ширина окна, h — высота окна (длина), c — ширина крайних стержней и замыкающих сторон (ярмо), a — толщина магнитопровода (на рис. 5 не показана). Размер d выполняется обычно от 4 до 1 см (иногда до 0,9 и 0,8 см).

Магнитопровод и пластины обозначаются Ш40—Ш10 (по ширине, выраженной в миллиметрах).

Приведем ориентировочные значения размеров. Для БТ: $b = (1,2 \div 0,6)d$; $h = (1,5 \div 3)d$; $c = (0,5 \div 0,65)d$. Для

СТ $b=(1,2 \div 2)d$; для СТ1 $b=(1 \div 1,5)d$; для СТ и СТ1: $h=(2 \div 3)d$; для БТ и СТ: $a=(1 \div 3)d$. Размеры даны для 50 Гц. Для повышенных частот a принимают от 0,6 до 1,5—2.

Для стандартизации размеров вводятся междуведомственные нормы. Они ограничивают указанные размеры определенными соотношениями, удовлетворяющими большинство общих требований к т. м. м., и вводят типы и типоразмеры для пластин, магнитопроводов и трансформаторов. В приложениях 1 и 2 приведены основные

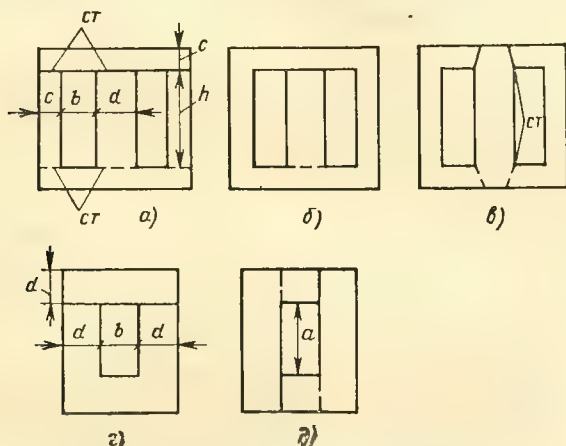


Рис. 5. Пластины стали для магнитопроводов.

a — $в$ —пластины БТ типа Ш, $г$, $д$ —пластины СТ типов П и Г; $ст$ —стыки в магнитопроводе.

нормали на штампованные пластины и магнитопроводы БТ.

Специальные т. м. м. в большинстве выполняют с отклонением не только от нормалей, но и от приведенных выше значений.

На некоторых заводах применяют нормали на ленточные (разрезные) магнитопроводы. Эти нормали не приводим, поскольку они не технологичны для мелкосерийного производства.

Для большинства нормалей на магнитопроводы БТ ширина ярма $c=0,5d$. Поэтому значение c упоминается в тех нормалях, где оно отлично от указанного значения.

Приведем для БТ широко распространенную нормаль НО.666.000. Она имеет основную и дополнительную модификации. По основной $b=d$, $h=2,5d$, по дополнительной

ной $h=1,5d$. Толщина магнитопровода обеих модификаций по нормали выполняется по прогрессии (см. П-1), на производстве часто применяют размер $a=(1; 1,5; 2; 2,5) d$.

Трансформаторы БТ выполняются обычно на пластинах до типоразмеров Ш25—Ш32. Промоздкость и высокая стоимость штампа делают большие размеры невыгодными. Помимо этого, по ряду показателей они уступают трансформаторам СТ. Последние могут применяться для мощных т. м. м. при обязательном условии, что первичная и вторичная обмотки разнесены на оба стержня. Располагать первичную обмотку на одном стержне, а вторичную на втором недопустимо, так как при этом значительно повышаются потоки рассеяния и резко снижаются вторичная мощность и к. п. д. Трансформаторы СТ1 для повышенной мощности применять не рекомендуется.

Выше показано влияние стыков магнитопровода на сопротивление магнитного потока. Рассмотрим пластины, применяемые в магнитопроводе БТ, и их магнитные и технологические показатели. Чаще всего применяются пластины, показанные на рис. 5, а. Магнитопровод на этих пластинах имеет четыре стыка на пути магнитного потока, что значительно повышает магнитное сопротивление. Особенно это сказывается на малых т. м. м. (с малой длиной магнитной линии). Магнитопроводы на пластинах, приведенных на рис. 5, б и в, имеют по два стыка, потери на сопротивлении стыков в 2 раза меньше. Из них второй тип (рис. 5, в) давно и необоснованно забыт. Из указанных пластин наиболее сложны в сборке пластины, показанные на рис. 5, б, применение их требует укорочения каркаса, ограничивает высоту щек каркаса, используемых часто для крепления выводов, затрудняет сборку при большом количестве выводов. Пластины, показанные на рис. 5, в, более технологичны: может быть применен каркас нормального размера, сборка значительно проще, чем пластин, показанных на рис. 5, б.

Сказанное относится к пластинам с нормальной шириной ярма $0,5d$. В некоторых случаях ярмо уширяют до значений $c= (0,6 \div 0,65) d$. При этом с насыщением основного стержня ярмо не достигает насыщения и ограничивает резкое возрастание тока I_0 , что допускает повышение индукции в основном стержне. Уширение ярма применяют иногда по ширине окна $b=d$ и почти всегда при уменьшенной ширине окна.

Остановимся на этом подробнее. Одним из параметров магнитопровода является длина магнитной линии l_c . Эта длина для БТ (при $c=0,5d$) определяется по осевым линиям ярма и по средней линии половины ширины основного стержня.

При уширенном ярме часто определяют длину магнитной линии по осевым линиям ярма и за основу расчета принимают индукцию основного стержня.

Например, средняя длина магнитной линии пластины типа Ш20 по нормали НО.666.000 17,14 см. При этом же окне, но с уширенным ярмом $(0,6 \text{ и } 0,65)d$ длина l_c соответственно равна 17,62 и 17,86 см, т. е. с уширением ярма l_c несколько увеличивается, что при формальном расчете по индукции среднего стержня приводит к фиктивному повышению потерь в стали.

Следует иметь в виду, что при индукции в основном стержне $B=1,2$ Т индукция в ярме $B=1,0$ Т (при $c=0,6d$). Удельные потери в стали ярма P_c (кг) снизятся в $1,2^2$, но поскольку масса ярма увеличится в 1,2 раза, активные потери снизятся в 1,2 раза против нормального выполнения ярма. При $c=0,65d$ потери снизятся в 1,3 раза. Эквивалентная длина ярма (по активным потерям) соответственно снижается в 1,2 или 1,3 раза, а не увеличивается, как это имеет место при формальном расчете l_c и P_c .

Значительно больше разница в потерях н. с. в стыках. Разница между кривыми 1 и 2 (рис. 3) при индукции 1 Т (отрезок ab) примерно в 5 раз меньше, чем при 1,3 Т, следовательно, потери н. с. в угловых стыках не превысят 20—25% потерь в стыке основного стержня.

Небольшое уширение ярма применяется в силовых мощных трансформаторах (откуда и заимствовано уширение ярма для т. м. м.). В первых стыки всегда располагаются в зоне уширения.

На пластинах, приведенных на рис. 5, в, стыки расположены на участках пониженной индукции. Поэтому уширение ярма очень эффективно, особенно при нормальном окне. Характеристики подобного магнитопровода близки к кривой 2 (рис. 3), что допускает значительное повышение индукции даже на малых т. м. м.

В приложении П-2 даны основные размеры нормали НЮ. 010. 005 с уширенным ярмом и уменьшенной шириной окна и ориентировочные значения коэффициента k_m по [Л. 1].

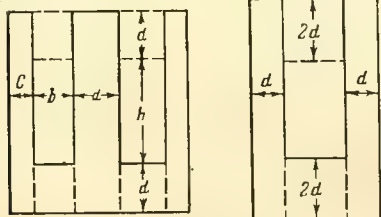
Стержневые магнитопроводы (рис. 5 г, д) имеют четыре стыка, оба стержня выполняются обычно одинаковой ширины, как трансформаторов СТ и СТ1. Поскольку трансформаторы СТ выполняются обычно для повышенных мощностей, снижение тока I_0 менее существенно.

Магнитопроводы с уширенным основанием пластин. Особо надо остановиться на магнитопроводах, выполненных на пластинах, показанных на рис. 6. Эти пластины отличаются отсутствием верхней замыкающей перемычки. Нижняя перемычка выполняется для магнитопровода БТ той же ширины, что и

средний стержень (d), для СТ — двойной ширины ($2d$). Собираются пластины вперекрышку. Сверху и снизу с торца получается решетка с продольными просветами. Сечение по всей длине магнитной линии одинаково, кроме углов, где сечение вдвое больше. Переход потока в поперечные пластины происходит по площади соприкосновения пластин, которая составляет для магнитопровода БТ $(n-1)d^2$, для СТ — $2(n-1)d^2$, где n — число пластин в пакете. Пренебрегая единицей, получаем:

$$\text{для БТ} — nd^2, \quad \text{для СТ} — 2nd^2. \quad (12)$$

В магнитопроводе на этих пластинах индукция на участках перехода почти в 2 раза ниже индукции в стержнях, что приводит к снижению активных потерь и не приводит к увеличению магнитного сопротивления I_0 . Магнитопровод на этих пластинах имеет коэффициент k_r , близкий к единице, и сохраняет параметры стали.



а)

б)

Рис. 6. Пластины стали с уширенным основанием.

а — тип Шу; б — тип Пу. Пунктиром указаны нижние пластины.

Следует сказать, что пластины такой конфигурации применялись в отдельных случаях уже давно. Но их применение определялось стабильностью магнитопровода и постоянством тока намагничивания, почти не зависящего от качества штамповки и сборки, чем эти пластины выгодно отличаются от пластин обычного профиля. При этом упрощается сборка магнитопровода.

Преимущества магнитных характеристик этой конструкции оставались без внимания, пока не появились магнитно-мягкие материалы типа пермаллоя с очень высокой магнитной проницаемостью.

Сплавы пермаллоя. В современных высокоэффективных магнитных преобразователях во многих случаях магнитные материалы работают в слабых магнитных полях. Это привело к разработке новых магнитных материалов на основе железо-никелевых сплавов с очень высокой начальной и максимальной магнитной проницаемостью.

С появлением пермаллоев выявилась непригодность магнитопроводов, имеющих на пути магнитного потока участки повышенного сопротивления. Неизбежен был переход на магнитопроводы типа тороидов, сложных по технологии выполнения обмоток, особенно для мелко-серийного производства.

Для выяснения возможности использования новых магнитных материалов не только в виде тороидов, но и с применением штампованных пластин проводились испытания в Союзе и за рубежом. Автором в б. ЦЛЭМ Мосэнерго в 1956 г. проводились испытания магнитопроводов на пластинах типов Ш и П, но с уширенным основанием на горячекатаных сталях и на пермаллое [Л. 8]. За рубежом проводились испытания различных конструкций, в том числе аналогичных типу П, с уширенным основанием (рис. 6, б) [Л. 15]. В Москве английская фирма демонстрировала аналогичные пластины типа Ш с уширенным основанием [Л. 16]. Испытания проводились на различных материалах с подобными конфигурациями пластин. Выводы по испытаниям, проводимым независимо разными авторами, в основных положениях совпадали. Тороиды для новых магнитных материалов во многих случаях возможно заменить магнитопроводами из штампованных пластин, аналогичных приведенным на рис. 6.

Основным качеством этих сплавов (помимо высокой начальной и максимальной магнитной проницаемости) является высокая линейность начальной части характеристики $B=f(H)$, резкий переход в насыщенную часть (узкая петля гистерезиса). Применяются сплавы пермаллоя до 10—20 кГц. Некоторые сплавы имеют предел значительно выше.

Сплавы пермаллоя содержат от 33 до 80% никеля, до 10% легирующих присадок (молибден, кобальт, хром и др.), остальное — железо. В наименовании марки сплава указывают его состав: 50Н (50% никеля), 79НМ (79% никеля 5% молибдена). Сплав марки 50Н имеет индукцию насыщения $B_m=1,5 \div 1,6$ Т, потери при $B_{0,5}$ составляют 1,3—1,5 Вт/кг, при $B_{1,0}$ 5—5,5 Вт/кг. Для сплава марки 79НМ $B_m=0,7 \div 0,75$ Т, потери при $B_{0,5}$ составляют 0,5—0,55 Вт/кг (указанные значения потерь относятся к частоте 400 Гц). Супермаллой аналогичен сплаву 79НМ, но имеет присадку магния 0,5%. Из всех сплавов он имеет наибольшую начальную и максимальную проницаемость.

Пермаллоевые сплавы нетекстурованные (ГОСТ 10160-62).

Помимо сплавов пермаллоя достаточно высокими магнитными свойствами на повышенных и ультразвуковых частотах обладает сплав железа с алюминием — алфенол (марка Ю-16), его максимальная индукция $B_m = 0,7T$, но по максимальной магнитной проницаемости он более чем в 2 раза превосходит сплав 50Н. Благодаря своей дешевизне алфенол в ряде случаев может конкурировать с пермаллоями.

То обстоятельство, что для пермаллоевых сплавов непригодность устаревшей конструкции пластин магнитопровода была очевидна, способствовало широкому внедрению для этих сплавов новой конфигурации пластин для специальных т. м. м. в автоматике, телемеханике и других областях. Для электротехнических сталей эта форма пластин принята на некоторых предприятиях, как, например, на Чебоксарском электроаппаратном заводе, где пластины типов Шу и Пу широко применяют для специальных т. м. м.

Витые магнитопроводы броневого и стержневого типа. В условиях мелкосерийного производства могут выполняться магнитопроводы витые (ленточные). Они изготавливаются броневого и стержневого типа (рис. 7). Для таких магнитопроводов следует применять ленточную сталь. Согласно ГОСТ 9925-61 холоднокатаная рулонная сталь выпускается различных марок толщиной от 0,05 до 0,5 мм при ширине от 5 мм и выше. В П-7 приведены марки и размеры лент, применяемые для т. м. м. В основном (для 50 Гц) применяются марки Э310—Э330А, 0,35 мм, для специальных — Э370, Э380.

При отсутствии ленточной стали можно отрезать от листов холоднокатаной или горячекатаной стали соответствующие полосы (обязательно вдоль проката). В местах перегибов ленты рекомендуется прокладывать вкладыши из гетинакса или плотного дерева, примерные образцы которых даны на рис. 7,2. Их профиль определится толщиной ленты и габаритами магнитопровода. Вкладыши обеспечивали более плотную намотку сердечника и меньшую механическую напряженность стали в местах изгибов (о чем сказано ниже). Намотка ведется до заполнения окна каркаса, затем заклинивается полоской гетинакса 0,5—1,0 мм. При намотке сердечни-

ка двухкаркасного трансформатора полоса стали проходит через оба каркаса (при сборке следует учесть полярность и удобный монтаж выводов). До намотки рекомендуется скрепить оба каркаса. Для броневого т. м. м. намотка сердечника ведется одновременно двумя лентами, так чтобы они заходили в окно каркаса с одной стороны. Оба полусердечника заклиниваются одной полоской гетинакса.

Преимущества таких магнитопроводов в том, что отсутствуют участки повышенного сопротивления, магнитопровод воспроизводит параметры стали и сохраняет

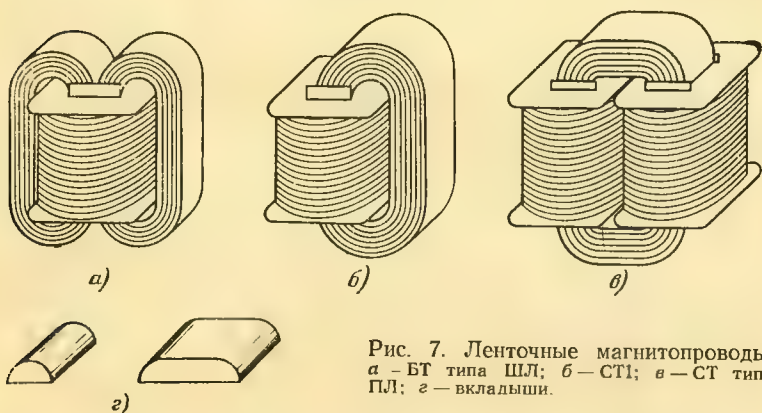


Рис. 7. Ленточные магнитопроводы. а — БТ типа ШЛ; б — СТ1; в — СТ типа ПЛ; г — вкладыши.

магнитную проницаемость стали μ . Кроме того, размер каркаса не ограничен предварительно размерами окна магнитопровода. К недостаткам следует отнести сложность изготовления и ремонта.

В настоящее время ленточные сердечники начинают широко применять как для силовых, так и для специальных т. м. м. Однако выполнение, приведенное выше, нельзя поставить на конвейер, что является серьезным препятствием. В заводских условиях ленточный сердечник проклеивают, разрезают на две подковки и торцы шлифуют. При трансформаторе СТ оба зазора приходится внутри каркасов.

Слабым участком в технологии изготовления таких магнитопроводов является шлифовка торцов подковок магнитопровода. При средней длине магнитной линии и шлифовке торцов с точностью до 3 мкм сопротивление магнитопровода повышается на 10—15%, до 5 мкм — до

20%. При зазоре 2×15 мкм сопротивление магнитопровода, выполненного на пермалловом сплаве, может повыситься в 3—10 раз [Л. 1,15]. При уменьшении длины магнитной линии сопротивление зазоров не изменится, но по отношению к длине l_c соответственно повысится. В полукустарном производстве практически невозможно обеспечить требуемую точность шлифовки.

В последнее время подобные разрезные магнитопроводы с деталями крепления и картонными каркасами (без обмоток) выпускаются для радиолюбителей. К ним прилагается паспорт с рекомендуемыми электромагнитными параметрами и указаниями по применению. Применение таких магнитопроводов для т. м. м. ограничено и допустимо лишь после проверки их параметров, в основном $B=f(H)$, поскольку эта характеристика является основной. Фактически на многих партиях эта характеристика лучших паспортных данных.

Поэтому при применении таких магнитопроводов в мелкосерийном производстве рекомендуется снятие их характеристик $B=f(H)$ с разнесением по категориям и последующим использованием в зависимости от технических условий. Это расширит область их применения. При форсированных режимах и повышенных требованиях надежности картонные каркасы следует заменять.

При сталях с высокой начальной магнитной проницаемостью применение витых разрезных магнитопроводов не может быть рекомендовано, так как отрицательный эффект зазора проявляется уже при начальных значениях индукции.

Механическая напряженность стали. Отжиг стали. Начиная с проката листов стали на заводе, в листах создается механическая напряженность. Еще более она увеличивается при механической обработке листов стали, штамповке пластин, отверстий, резке и даже при сборке магнитопровода за счет перегибов, неизбежных при некоторых конфигурациях пластин. При этом ухудшаются магнитные свойства сталей, повышаются активные потери, снижается магнитная проницаемость. Это ухудшение параметров стали особенно значительно сказывается в пределах рабочих значений индукций. Для снятия напряженности пластин их подвергают термической обработке — отжигу. Восстановительный отжиг повышает магнитную проницаемость на 50—70% и более против первоначальной.

Рекомендации разных авторов по отжигу и технологии отжига на различных предприятиях несколько различаются. Но в основном все способы сводятся к четырем видам: 1) вакуумный отжиг, 2) отжиг в атмосфере водорода (инертного газа), 3) отжиг с ограниченным доступом воздуха (кислорода), 4) без ограничения доступа воздуха — ускоренный окисный отжиг.

Лучшим является вакуумный отжиг, незначительно уступает ему водородный отжиг. Но они требуют дополнительного помещения, оборудования и трудоемки. Поэтому эти способы отжига применяются в основном для магнитно-мягких материалов типа пермаллоя. Температура отжига 1000—1200°С.

Отжиг с ограниченным доступом воздуха производится в нагревательных печах с укупоркой асбестом или песком, с укладкой чугунной стружки и промазкой щелей огнеупорной глиной. Температура отжига электротехнических сталей 800—900°С с выдержкой 3—4 ч. Охлаждение со скоростью 50°С в час. Чугунная стружка, окисляясь за счет кислорода воздуха, ограничивает доступ кислорода к стали. По этому способу допустимо отжигать и пермаллоевые сплавы, если нет возможности применять вакуумный или водородный отжиг, но при температуре отжига 1000—1200°С.

При ускоренном окисном отжиге пластины увязываются в пакеты (проволокой), укладываются на противень и закладываются в печь на 10—20 мин при температуре 750°С в зависимости от габаритов пакетов. Затем выгружаются и укладываются на лист асбеста. Этот отжиг уступает предыдущему, но снимает наклеп после механической обработки и обеспечивает заметное повышение магнитных параметров стали.

Надо иметь в виду, что многократный отжиг вреден — выгорают некоторые компоненты в стали. При необходимости повторного отжига последний производится при пониженной температуре. В литературе способы отжига описаны достаточно подробно [Л. 1, 13].

Пластины после отжига не следует подвергать механической деформации (удары, изгибы), так как повторно появляется механическая напряженность. Наименее это сказывается на сталях горячей прокатки. На холоднокатаных сталях магнитная проницаемость может несколько снизиться (на 15—20%). Значительно снижается магнитная проницаемость магнитно-мягких материалов типа

пермаллоя, на которых заметное снижение вызывают даже слабые механические воздействия (изгибы, легкие удары, зачистка шкуркой).

При выборе той или иной конфигурации пластин стали следует учитывать возможную деформацию пластин в процессе сборки магнитопровода, ухудшающую их магнитные параметры. При изготовлении т. м. м. с ленточным магнитопроводом лента стали до навивки должна пройти отжиг. При навивке повторного появится некоторая напряженность. Вкладыши обеспечивают более плотную намотку, снижают также повторную напряженность за счет более пологих изгибов ленты. Для этой же цели в малых т. м. м. можно применять более тонкую ленту (0,2 мм).

Штамповка пластин. Качество штамповки в большой степени влияет на параметры магнитопровода. При качественной штамповке мелкие заусенцы обычно выгорают при отжиге. В кустарном производстве трудно обеспечить точность инструмента (пуансона и матрицы). Подчас один и тот же инструмент применяют для штамповки пластин толщиной 0,5 и 0,35 мм. Это приводит к заусенцам по периметрам пластин. То же имеет место и при затупленном инструменте. Вызываемые заусенцами замыкания пластин приводят к повышению тока намагничивания и потерь в стали, также снижают плотность сборки (особо значительное на пластинах, показанных на рис. 5,6). Крупные заусенцы снимают механическим путем на абразивных кругах. Иногда их снимают, пропуская через вальцы, но это может привести к наклепу и деформации пластин, так как листы по толщине могут иметь значительные допуски, различные для разных толщин листов (ГОСТ 802-58 и 9925-61). Торцевые заусенцы недопустимы на кромках пластин в местах стыковки. Снятие заусенцев производится до отжига.

При штамповке пластин из холоднокатаных сталей следует располагать сталь так, чтобы направление проката (текстуры) совпадало с осевым направлением основных стержней. Поперек текстуры магнитное сопротивление и потери повышаются при листах толщиной 0,5, 0,35 мм в 1,8—2 раза, при 0,2 мм — до 2,2 раза. Штамповка под углом к текстуре может (в зависимости от угла) привести к еще большему увеличению сопротивления. (По данным США на изготавливаемых ими ста-

лях сопротивление поперек проката выше в 3—5 раз, более текстурованы [Л. 1].) При применении пластин, показанных на рис. 5,а верхние перемишки следует штамповать отдельно вдоль проката. Пластины горячекатаной стали также рекомендуется штамповать вдоль проката (длинной стороны листа).

Изоляция пластин. Выше было сказано, что пластины стали должны иметь изоляцию. При индукциях ниже 0,9—1,0 Т достаточной изоляцией является окалина. Однако для предохранения от коррозии пластины должны иметь двустороннее покрытие лаком. Практикуемая иногда оклейка пластин бумагой не рекомендуется: снижается заполнение стали и усиливается коррозия стали. Применяется бумага в больших трансформаторах, в основном работающих с масляным охлаждением. В настоящее время широко применяется оксидирование и фосфатирование пластин. При оксидировании на пластинах образуется пленка 5—8 мкм; фосфатирование дает пленку 10—20 мкм. Обе пленки теплоустойчивы (до 200°С) и влагостойки [Л. 1].

Влияние отверстий для стяжки магнитопровода. Раньше, как правило, пластины снабжались отверстиями для стяжки магнитопровода шпильками. Кроме того, шпильки изолировались от стали и от металлических скоб во избежание образования короткозамкнутых витков. Для этого отверстия пробивались с учетом изоляции. Большинство специализированных предприятий и заводов отказались от пробивки отверстий в малых т. м. м., а ряд заводов выполняют стяжку магнитопроводов для т. м. м. мощностью 150—200 Вт и более без пробивки отверстий. Однако на предприятиях бытового профиля широко применяют штамповку пластин с отверстиями. Последние, уменьшая сечение стали, увеличивают магнитное сопротивление и ток намагничивания, особенно когда они приходится на участки повышенного сопротивления (стыки). При стержневых магнитопроводах влияние отверстий меньше (шире стержни по отношению диаметра отверстий). Значительно повышается влияние отверстий при применении холоднокатаных сталей. Даже в силовых трансформаторах большой мощности стяжку стержней выполняют хомутами (без пробивки отверстий) [Л. 12].

Рассмотрим, насколько обосновано применение изоляции шпилек от магнитопровода и стяжных скоб.

На рис. 8 показано направление магнитных линий в стержневом магнитопроводе. При соединении всех шпилек с каждой стороны магнитопровода накладками от внутреннего угла магнитопровода, где магнитные линии уплотнены, они частично уходят под образованный шпильками и накладками виток, но к следующему углу возвращаются обратно. В каждой половине витка наводится э. д. с., но обе э. д. с. направлены встречно, и

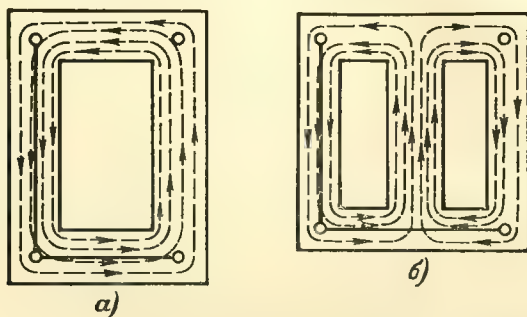


Рис. 8. Распределение магнитных линий в магнитопроводе.

а — в стержневом; б — в броневом.

тока в витке не будет. Поэтому отверстия можно делать по шпилькам, не ослабляя сечения стали.

При магнитопроводе типа Ш поток, выходящий из среднего стержня (рис. 8,б), расходуется в обе стороны. Для части потока, проходящего по наружным сторонам отверстий, виток является замкнутым и наводимая э. д. с. приводит к появлению тока в витке и потерям. При отсутствии накладок остаются короткозамкнутые витки за счет контактирующих со шпильками пластин стали. Эти потери случайны и учету не поддаются.

Стяжка и крепеж трансформатора. Стяжка малых т. м. м. производится чаще всего обоймами или скобами. На рис. 9,а, б показана стяжка Ш- и П-образных т. м. м. обоймами, которые крепятся лапками (двумя или четырьмя) либо винтами. Часто магнитопровод в обойме закрепляют свободными лапками — рис. 9,в, г (показаны снизу, без шасси). При горизонтальном расположении магнитопровода на шасси его можно крепить скобами или более крупные стягивать планками и шпильками. При расположении нижних пла-

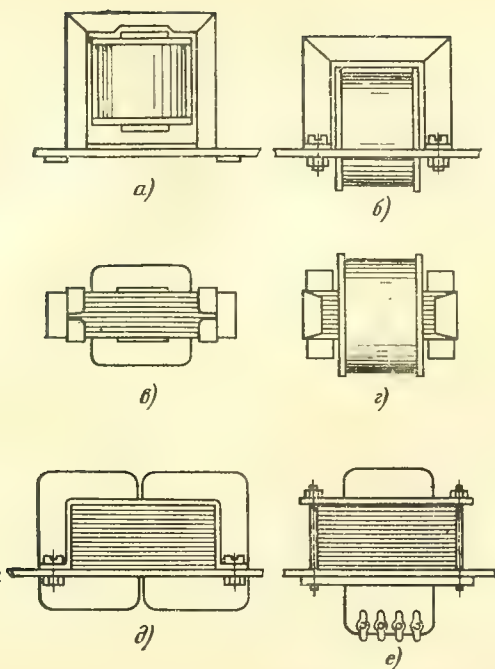


Рис. 9. Стяжка магнитопровода и крепление на шасси.

а—г — обоймами; *д* — скобами; *е* — накладками.

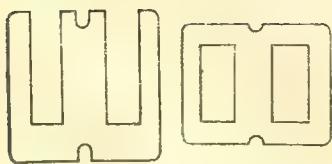


Рис. 10. Пластины стали с пазами для стяжки рамками.

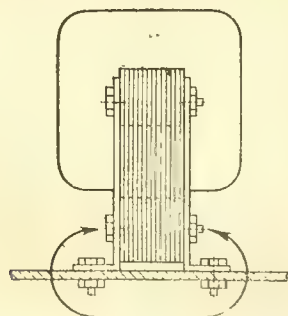


Рис. 11. Установка трансформатора на шасси.

Стрелка показывает путь короткозамкнутого витка.

нок под шасси создается более жесткая связь с шасси (рис. 9,е). При приварке нижних планок точечной сваркой повышается ремонтпригодность устройства; кроме того, планки выполняют роль ребер жесткости.

При пластинках типа Ш можно применять пазы (рис. 10). При этом следует применять стяжные рамки.

Стержневые магнитопроводы мощностью выше 300—500 Вт проще всего стягивать накладками (или уголками) и шпильками. Но часто, особенно при больших размерах, их стягивают шпильками (или болтами) через отверстия. Такая стяжка проще по технологии и надежнее. Хотя при этом короткозамкнутые витки не создаются, при установке на шасси (или на раме) они могут появиться за счет закорачивания шпилькой, крепежом и рамой части магнитопровода (рис. 11).

3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Провода. Обмотки т. м. м. малой мощности обычно выполняются медным проводом круглого сечения. Сортамент применяемых медных проводов (без изоляции) по ГОСТ 2112-62 дан в приложении П-4. В таблице провода диаметром менее 0,05 мм не указаны, поскольку для т. м. м. они не применяются. Помимо медных проводов выпускаются алюминиевые провода. Их марки начинаются с букв АП (алюминиевые провода). Применять их для т. м. м. не рекомендуется.

В настоящее время имеется большое количество марок обмоточных проводов. Провода изготавливаются с волокнистой, эмалевой и комбинированной эмалево-волокнистой изоляцией. Для обозначения марок проводов приняты буквенные обозначения. Первая буква для всех видов изоляции П (провод). Волокнистая изоляция имеет обозначения: Б — хлопчатобумажная пряжа, Ш — натуральный шелк, Л — лавсан, С — стекловолокно, А — асбестовое волокно. Следующая буква О или Д указывает на один или два слоя изоляции. Провода в эмалевой изоляции обозначаются буквой Э. Комбинированные изоляции состоят из эмалевой изоляции, покрытой дополнительно волокнистой изоляцией. Основные марки обмоточных проводов даны в табл. 4.

Лавсан заменил применявшийся ранее капрон (марок К и ШК). Их изоляционные параметры близки, но

лавсан менее склонен к старению и более теплоустоек (до 200° С).

При изготовлении т. м. м. в основном применяются провода в эмалевой изоляции. Слой эмали должен иметь сплошную и ровную поверхность, обладать достаточной механической прочностью и эластичностью, эмаль-слой не должен давать трещин и отставаний от меди при намотке.

Таблица 4

Марка	Расшифровка марки	Диаметр по меди, мм	ГОСТ или ТУ
<i>Эмалевая изоляция</i>			
ПЭЛ	Маслостойкий эмаль-лак на масляно-смоляной основе	0,02—2,44	2773-69
ПЭВ-1	Эмаль-лак на полиацеталевой и полиамидной основе, лак ВЛ-931	0,02—2,44	7267-70
ПЭВ-2	То же с повышенной изоляцией	0,05—2,44	7262-70
ПЭМ-1	Металлическая	0,06—2,44	10288-66
ПЭМ-2	То же с повышенной изоляцией	0,06—2,44	10288-66
ПЭТВ	Теплостойкий высокопрочный полиэфирный эмаль-лак № 124	0,06—2,44	ОСТ 16.505.001-70
ПЭВТЛ-1	Высокопрочная полиуретановая эмаль	0,06—1,56	МРТУ 16.505.00.9-64
ПЭВТЛ-2	То же с повышенной изоляцией	0,06—1,56	МРТУ 16.505.009-64
<i>Эмаль с волокнистой изоляцией</i>			
ПЭЛВО	Лакостойкая эмаль в одной хлопчатобумажной обмотке	0,38—2,1	16507-70
ПЭЛШО	То же, обмотка—натуральный шелк	0,05—1,56	16507-70
ПЭЛЛО	То же, лавсан	0,05—1,3	16507-70
ПЭВЛО	То же, высокопрочный лавсан	0,06—1,3	16507-70
<i>С волокнистой изоляцией</i>			
ПБД	С двойной хлопчатобумажной обмоткой	0,38—5,2	16513-70
ПСД	Два слоя стекловолосна с пропиткой нагревостойким лаком	0,31—5,2	7019-71
ПСД-Л	То же с поверхностным лаковым слоем	0,31—5,2	7019-71
ПСДТ	Два слоя стекловолосна тонкослойного	0,31—2,1	7019-71
ПСДТ-Л	То же с лаковым слоем	0,31—5,2	7019-71
ПСДК	Два слоя стекловолосна с пропиткой кремнийорганическим лаком	0,31—5,2	7019-71
ПСДК-Л	То же с лаковым слоем	0,31—5,2	7019-71
ПСДКТ	То же с тонкослойным стекловолосном	0,31—2,1	7019-71
ПСДКТ-Л	То же с поверхностным лаковым слоем	0,31—2,1	7019-71
ЦДА	Один слой асбестовой ровницы с пропиткой нагревостойким лаком	1,81—4,8	7019-71

Высокая механическая прочность и повышенная теплоустойкость проводов в эмалевой изоляции позволяют снизить количество межслойных прокладок, повысить теплопроводность и допустимую плотность тока. Это обеспечило эмалевым проводам широкое применение при изготовлении т. м. м. Для обмоток на повышенные

напряжения (например, в обмотках высокого напряжения осциллографа) часто применяют провод ПЭЛШО (или ПЭЛБО) с пропиткой изоляционным лаком. Этот провод целесообразно применять для галетных обмоток в связи с высокой схватываемостью волокнистых мате-

Таблица 5

Класс нагре- востойкости	Нагревостой- кость матери- ала данного класса, °С	Электроматериалы, соответствующие классам нагревостойкости
У	90	Электроматериалы из целлюлозы, шелка, хлоп- чагобумажные и другие аналогичные непропитанные и непогруженные в жидкий изоляционный материал Провод ПЭЛ, ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПЭЛЛО и др.
А	105	Электроматериалы класса У, пропитанные изоли- рующими лаками, компаундами и другие, соответ- ствующие данному классу материалы Провод ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭЛЛО и др.
Е	120	Некоторые синтетические пленки и другие соот- ветствующие данному классу материалы Провод ПЭЛЛО, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2 и др.
В	130	Материалы на основе слюды, стекловолокна на органических подложках, некоторые синтетические пленки и другие соответствующие данному классу материалы Провод ПСД, ПСДТЛ, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ
Г	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекло- волокна на синтетических связующих, некоторые синтетические пленки и другие материалы данного класса Провод ПСД, ПСДТЛ, ПЭТВ
Н	180	Те же материалы, применяемые в сочетании с кремнийорганическими соединениями и другими со- ответствующими материалами Провод ПСДК, ПСДКТ, ПЭТКСО
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц. Провод ПСДК, ПСДКТЛ, ПЭФ-2 (до 200—250°С)

Примечание. При сочетании материалов с разной теплостойкостью применение отдельных материалов предыдущего класса допустимо при соответствующих испытаниях на макетах или на реальных конструкциях (ГОСТ 8865-70), приложение 1).

риалов с большинством склеивающих и пропитывающих лаков и компаундов.

Для сварочных, нагрузочных и других аналогичных трансформаторов и устройств следует применять теп-
лостойкие провода в стеклянной изоляции марок

ПСД — ПСДКТ; бывает целесообразным применять провода прямоугольного профиля. В настоящее время имеется широкий ассортимент проводов этих марок (ГОСТ 7019—71). В приложениях П-5÷П-6 приведены дополнительные данные по проводам.

Все электроизоляционные материалы и провода в изоляции по нагревостойкости разбиты на классы (табл. 5). Класс У может применяться только для изделий бытовых (общего пользования) и технических, не требующих количественной оценки надежности. Однако достаточна предварительная пропитка всех целлюлозных, шелковых материалов (без пропитки обмотки в целом) и изделие переходит в класс А.

По существу классы нагревостойкости начинаются с класса А, который является основным и для трансформаторов малой мощности. Иногда применяется и класс Е.

В тех случаях, когда т. м. м. может работать в форсированном режиме, обмотка должна пропитываться, так как при этом повышаются теплопроводность и нагревостойкость за счет более равномерной температуры в толще обмотки. При форсированном режиме допустимо повышать нагрев т. м. м. на 10—12°С сверх температуры данного класса. При этом ускоряется процесс старения материала в среднем в 2 раза. Для т. м. м., к которым предъявляются требования надежности, форсированные режимы недопустимы.

Приведенная шкала классов нагревостойкости принята как в СССР, так и в ряде зарубежных стран.

Нижний предел допустимых температур для эмальпроводов — минус 60°С. При этой температуре эмаль не должна трескаться и отставать от меди.

Электроизоляционные материалы должны обеспечивать электрическую изоляцию между отдельными токопроводящими элементами электрических устройств, находящихся под разным потенциалом. При повышении напряжения (разности потенциалов), приложенного к изоляции, наступает критическое значение напряжения, при котором изоляция пробивается. Это значение напряжения именуется *пробивным напряжением*, а свойство изоляции выдерживать длительно определенное напряжение называется *электрической прочностью*.

Пробивное напряжение относят к 1 мм (или 1 см) толщины изоляции. С повышением температуры элект-

рическая прочность снижается: так, например, электрическая прочность электрофарфора при перепаде температуры от 20 до 100°С снижается на 30% и практически теряется при 350°С.

Наличие воздушных прослоек в изоляции приводит к ионизации воздуха и снижению электрической прочности изоляции.

Влажность материала также значительно снижает электрическую прочность; так, например, при влажности трансформаторного масла 0,01% пробивное напряжение снимается с 50 до 15 кВ/2,5 мм. Для трансформаторного масла принято расстояние 2,5 мм при определенной форме электродов.

Обычно в трансформаторах малой мощности (за некоторыми исключениями) запас по пробивному напряжению очень велик, но может быть тепловой или электрохимический пробой.

Электроизоляционные материалы, находясь под напряжением, пропускают незначительный ток — *ток утечки*. Величина тока утечки определяется приложенным напряжением и сопротивлением изоляции. Ток утечки нагревает изоляцию, что приводит к снижению пробивного напряжения: в изоляции развиваются электрохимические процессы, приводящие к уменьшению сопротивления изоляции (старению изоляции) и еще большему увеличению тока утечки. Это может привести к тепловому или электрохимическому пробую. Ускоряет старение изоляции наличие влаги в атмосфере и, в очень большой степени, наличие активных газов.

Токи утечки могут проходить как через толщу материала, так и по его поверхности. Величина тока, проходящего через толщу материала, определяется его *объемным сопротивлением*, проходящего по его поверхности *поверхностным сопротивлением*. Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·см, численно равно сопротивлению кубика материала при напряжении, приложенном к двум противоположным граням двумя электродами площадью 1 см². Последние имеют плотный контакт с гранями кубика. Поверхностное сопротивление боковых граней кубика исключается схемой испытания.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s равно сопротивлению квадрата на поверхности материала между электродами, имеющими контакт с противоположными

сторонами квадрата (сопротивление не зависит от размера квадрата).

Объемные сопротивления изоляционных материалов — диэлектриков составляют от 10^9 до 10^{20} Ом·см, поверхностные — от 10^8 до 10^{18} Ом/см. Объемное сопротивление более стабильно. Во влажном воздухе диэлектрики в зависимости от гигроскопичности снижают объемное сопротивление, впитывая влагу. Скорость впитывания может колебаться в очень широких пределах: от нескольких часов (для непропитанных хлопчатобумажных материалов) до одного месяца и более.

Поверхностное сопротивление быстро реагирует на изменение влажности воздуха. Кроме того, оно в значительной степени зависит от характера поверхности материала и его запыления. На глянцевой поверхности меньше оседает влаги, и она меньше подвержена загрязнению.

Гигроскопичность изоляционных материалов определяется по количеству влаги (в процентах к массе материала), которую впитывает сухой материал, помещенный в насыщенную водяными парами среду (обычно при температуре 20°C на 24 ч). Для некоторых материалов важна степень *влагопоглощаемости*, которая определяется аналогично гигроскопичности, но материал помещают в дистиллированную воду. В отдельных случаях определяется и гигроскопичность и влагопоглощаемость.

Большинство материалов обладает смачиваемостью, в зависимости от которой капля воды на поверхности материала растекается в большей или меньшей степени. Эти материалы называются *гидрофильными*. Если капля растекается равномерно по всей поверхности, смачиваемость называют *абсолютной*.

Другая группа материалов называется *гидрофобными* (водоотталкивающими). К ним относится группа так называемых воскообразных диэлектриков и некоторые другие. На их поверхности влага собирается мелкими каплями (как капли ртути на стекле), образуя прерывистую пленку. На рис. 12 приведены сравнительные характеристики поверхностных сопротивлений для некоторых типов диэлектриков.

Гидрофобные диэлектрики хорошо предохраняют обмотки от действия влаги. Возможности их применения в тех или иных случаях определяются их остальными свойствами. Одно из основных свойств электроматериа-

лов, которое приходится учитывать при изготовлении т. м. м., — это теплопроводность. Способность материалов проводить тепло характеризуется коэффициентом теплопроводности λ . Ниже приведены значения коэффициентов теплопроводности для некоторых материалов [Л. 2].

Материал	λ , Вт/(см·°С)
Медь	2,93—4,10
Сталь	0,45—0,48
Слюда	0,005—0,006
Миканиты	0,0021—0,0041
Гетинаксы, текстолиты, стеклотекстолиты	0,0017—0,00175
Шеллак	0,0018—0,0022
Глифталевые смолы	0,0012—0,0015
Полихлорвиниловые смолы	0,0018—0,0020
Формальдегидные смолы (бакелиты)	0,0015—0,0018
Электрокартон ЭВ непропитанный	0,0015—0,0018
Электрокартон ЭВ пропитанный	0,0023
Хлопчатобумажная ткань	0,0007
То же, пропитанная лаком	0,0012—0,0025
Лакоткань	0,0012—0,0013
Воздух (тонкие зазоры)	0,00025—0,0005

Помимо требований надежности и других требований, определяющих применение тех или иных электроизоляционных материалов, при выборе последних необходимо учитывать климатические и другие местные

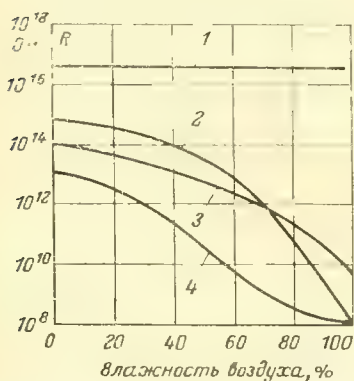


Рис. 12. Зависимость поверхностного сопротивления изоляционных материалов от влажности воздуха.
1 — парафин; 2 — шеллак; 3 — стеклолента (непропитанная); 4 — фарфор.

условия. По условиям работы аппаратура может иметь следующие исполнения.

Нормальное исполнение предназначено для работы аппаратуры в условиях нормальной влажности при отсутствии в воздухе активных газов, температуре воздуха

от $+20$ до $+35^{\circ}\text{C}$, т. е. в основном для аппаратуры, работающей в закрытых и отапливаемых помещениях. В тех случаях, когда эти изделия имеют низкий уровень надежности, обмотки трансформатора не пропитываются, что упрощает и удешевляет их изготовление и ремонт. Но в различных испытательных, нагрузочных и других устройствах (в основном предназначенных для разъездных работ), т. м. м. которых могут работать в форсированном режиме, обмотки следует пропитывать теплостойкими лаками независимо от требуемого уровня надежности. Это увеличивает теплопроводность обмоток и способствует повышению возможности их форсировки. Обмотка трансформаторов всех устройств, к которым предъявляются повышенные требования надежности, следует обязательно пропитывать. Это значительно повышает также и долговечность изделия.

Влагостойкое исполнение особенно необходимо в местах с жарким и сырым климатом. Количество влаги в воздухе зависит от температуры воздуха и от степени влажности. В 1 м^3 воздуха при его насыщении находится воды в виде пара при температуре $0, 20, 40, 60^{\circ}\text{C}$ соответственно $6, 24, 75, 130\text{ г}$. Воздух нормальной влажности содержит $60\text{--}65\%$ влаги от предела насыщения, сухой — содержит более 80% , сухой — менее 40% . При повышенной температуре воздуха нормальной влажности соответствует значительно большая абсолютная влажность, т. е. большее количество влаги в 1 м^3 воздуха [Л. 14].

При охлаждении воздух нормальной влажности становится пересыщенным и избыточный пар оседает в виде капель в порах обмотки, в зазорах стали магнитопровода, вызывая необратимое электрохимическое разрушение изоляции и коррозию стали магнитопровода и меди обмоток, часто приводящую к разъеданию и обрыву проводов (особенно частых при диаметрах менее $0,1\text{ мм}$). Аппаратуру влагостойкого исполнения следует применять на гидроэлектростанциях, торфяных болотах, в насосных, котельных. Применением соответствующих пропиток можно значительно снизить действие влаги.

Химостойкое исполнение применяется при наличии в воздухе активных газов. Последние приводят к таким же разрушениям, к каким приводит влага, но процесс протекает значительно интенсивнее, особенно в сочетании с влагой. Химостойкое и тропическое выполнения

примерно аналогичны. В обоих случаях хлопчатобумажные и целлюлозные материалы, а также провода ПЭЛ, ПЭВ-1 не применяются. Применяются стеклоткани и стеклотекстолиты. Предъявляются более повышенные требования к пропиточным лакам.

Для тропиков, кроме того, учитывают специфичные для тех или иных областей реагенты, в том числе микроорганизмы, разрушающие некоторые электролаки и материалы. В ряде случаев необходима консультация химиков.

При влагостойком, химостойком (и тропическом) выполнении пропитка всех обмоток обязательна, режимы нагрева трансформатора должны быть снижены.

К волокнистым электроизоляционным материалам относятся изделия хлопчатобумажные, шелковые, из древесной целлюлозы, а также нагревостойкие из стекловолокна и асбестового волокна.

Материалы первой группы, применяемые без пропитки, относятся к классу нагревостойкости У, допускающему максимальную температуру не выше 90°С. Следует указать, что целлюлозные материалы разрушаются и при нормальной температуре, но за время, исчисляемое годами. При температуре выше 90°С процесс разрушения резко убыстряется. Пропитка заполняет поры в этих материалах, значительно уменьшая поверхность соприкосновения с воздухом.

Из нагревостойких волокнистых материалов второй группы материалов широкое применение нашли стекловолокнистые изоляции, имеющие высокие электрические свойства, малую гигроскопичность и высокую прочность. Асбестовые изоляции в т. м. м. не применяются.

Из древесной целлюлозы и хлопчатобумажного волокна изготавливаются картоны марок ЭВ, ЭВС, ЭВТ для работы в воздушной среде, марок ЭМ — для работы в масле и др. Выпускаются в рулонах толщиной 0,1—0,8 мм и в листах от 1 до 3 мм. В т. м. м., предназначенных для бытовых устройств, картоны применяются для изготовления каркасов.

Из большого количества марок кабельной бумаги основное применение имеют марки К-080, К-120, К-170, где цифры обозначают толщину бумаги в микронах. Для межслойных прокладок часто применяют конденсаторную бумагу, выпускаемую толщиной от 4 до 30 мкн. Пропиточную бумагу применяют с подпиткой.

Хлопчатобумажное волокно применяется для изготовления лент и электроизоляционных тканей. Киперная лента толщиной 0,54 мм, тафтяная, миткалевая, батистовая — 0,22 мм. Для оплетки галетных обмоток т. м. м. можно применять батистовую и миткалевую ленту. Из тканей применяются перкаль и шелк в производстве лакотканей, мигаль и бязь в производстве текстолита. Шелковая ткань иногда применяется для межслойной и межобмоточной изоляций (с последующей пропиткой), чаще применяется шелковая лакоткань.

Стекловолокно применяется для изготовления лент и тканей. Ленты изготавливаются толщиной 0,1 мм (и тоньше) при ширине от 8 до 25 мм, ткань изготавливается толщиной от 0,1 до 0,06 мм, для специальных изделий — до 0,025 мм. Для электроизоляции применяется бесщелочное волокно.

В табл. 6 приведены для сравнения некоторые данные непропитанных лент.

Таблица 6

Параметры и свойства	Лента стеклянная	Лента хлопчатобумажная	Лента асбестовая
Ширина, мм	25	25	25
Толщина, мм	0,12	0,2	0,4
Гигроскопичность, %	0,98	18	6,9
Водопоглощаемость, %	11,8	85	75
Прочность на разрыв, Н/мм ²	2	0,4	0,1
Объемное сопротивление ρ_v , Ом·см	10 ¹⁴	10 ⁸	—
Поверхностное сопротивление ρ_s , Ом	10 ¹²	10 ⁷	3·10 ⁸

Марки лакотканей имеют буквенные обозначения. Первая буква Л — лакоткань, вторая Х, Ш, К, С — хлопчатобумага, шелк, капрон, стекловолокно, третья — основа (лак): М — масляный лак, Б — маслобитумный. Хлопчатобумажные лакоткани имеют марки ЛХМ, ЛХММ, ЛХМС, ЛХБ, толщина лакоткани от 0,15 до 0,30 мм. Шелковые (капроновые) лакоткани имеют марки ЛШМ, ЛШМС, ЛКМ, ЛКМС, толщину от 0,04 (ЛШМС) до 0,15 мм. Нагревостойкость лакотканей относится к классу А — 105°С (ГОСТ 2214-70).

На основе стеклоткани выпускаются стеклолакоткани марок ЛСМ, ЛСММ, ЛСЛ, нагревостойкость — класс

Е; ЛСЭ, ЛСБ — класс В; ЛСП, ЛСҚЛ — класс Г; ЛСҚ, ЛСКР — класс Н. Толщина стеклолакотканей от 0,8 мм до 0,24 мм (ГОСТ 10156-70).

Стеклолакоткани нагревостойкостью класса Н выдерживают температуру до 200°C, кратковременно (в течение 2—3 ч) — до 250°C.

По ТУ министерств и заводов выпускается ряд марок лакотканей, стеклолакотканей и пленочных материалов — пленка триацетатная, ТУ 16-76, 0,25—0,04 мм, $\rho_V = 10^{14}$ Ом·см, класс нагревостойкости А; фторопласт Ф-4, ТУМ 549-56, 0,01—0,1 мм, $\rho_V = 10^{15}$ Ом·см, класс С и др. Пленки тропикоустойчивы. Их недостаток — плохая схватываемость (адгезия) с компаундами.

Для т. м. м., к которым предъявляются высокие требования надежности, рекомендуется применять стеклолакоткани. То же рекомендуется в жарком и сыром климате, особенно при наличии поблизости химических заводов (также в тропиках). Для сырых помещений можно применять лакоткань марки ЛХБ и стеклолакоткань марки ЛСБ.

Для изготовления каркасов для обмоток применяют листовые материалы, состоящие из нескольких слоев бумаги или текстиля, пропитанных лаками на основе бакелитовых смол: гетинаксы, текстолиты.

Гетинакс выпускается в листах различных марок (ГОСТ 2718-66). Обычно (для 50 Гц) применяют следующие марки: I и II, предназначенные для работы на воздухе в нормальных условиях; III — для работы в условиях повышенной влажности (влажность 95% при $T = 20^\circ\text{C}$); IV то же (95%, $T = 35^\circ\text{C}$); V-1, V-2 — для работы в масле или на воздухе в нормальных условиях. Толщина листов указанных марок от 0,2—0,5 до 50 мм; объемное сопротивление $\rho_V = 10^{10} \div 10^{12}$ Ом·см. После пребывания в течение 24 ч в камере влажности (95—98%, $T = 20^\circ\text{C}$) ρ_V снижается до 10^8 — 10^{10} Ом·см в зависимости от марки гетинакса. Выпускаются гетинаксы для повышенных частот.

Текстолиты (ГОСТ 2910-67) применяются марки А для работы в масле и на воздухе, Б и Г — для работы на воздухе, повышенной механической прочностью. Толщина листов текстолита от 0,5 до 50 мм. Текстолит лучше подвергается штамповке, но его электрические свойства и гигроскопичность несколько уступают гетинаксу; кроме того, он значительно дороже.

Гетинаксы и текстолиты предназначены работать при температуре окружающей среды от минус 60 до плюс 70°C. Допустимая рабочая температура гетинакса 120°C, выдерживает 140°C, при 150°C может отслаиваться. Для марок гетинакса на повышенные частоты и большинства марок текстолита рабочая температура 105°C.

На базе стеклолакотканей выпускается электротехнический листовой стеклотекстолит (ГОСТ 12652-67) марок СТ, СТ-Б, СТ-І для работы на воздухе при нормальных климатических условиях, рабочей температуре до 130°C (класс В); СТ-II — то же, класс F; СТЭФ, СТФ-І — для работы в условиях повышенной влажности (95%, 35°C), (класс F); СТК — то же (класс Н).

Стеклотекстолиты отличаются высокой механической прочностью и низкой гигроскопичностью. Объемное сопротивление стеклотекстолитов марок СТЭФ и СТЭФ-І $\rho_v = 10^{13}$ Ом·см, после пребывания в течение 24 ч в камере влажности (95%, 20°C) $\rho_v = 10^{12}$ Ом·см. Стеклотекстолит СТК имеет допустимую температуру до 200°C, кратковременно выдерживает до 250°C.

Электролаки по назначению подразделяются на пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для пропитки обмоток и заполнения пор в обмотке проводов. Это способствует снижению гигроскопичности, увеличивает теплопроводность и электрическую прочность, при этом снижается старение материалов, следовательно, повышается долговечность и надежность обмотки.

Покровные лаки, создавая на обмотке гладкую и глянецовую поверхность, улучшают циркуляцию воздуха и конвекцию тепла обмотки в окружающую среду, дополнительно повышают влаго- и химозащиту, механическую прочность обмотки и улучшают внешний вид.

Клеящие лаки служат для склеивания различных материалов. Они должны иметь высокие электроизолирующие свойства при высокой клеящей способности.

Для заполнения всех пор в обмотке пропиточные материалы должны иметь малую вязкость. В оставшихся порах ионизация воздуха вызывает местное старение изоляции и снижение электрической прочности. Для т. м. м. с относительно малыми напряжениями (за редкими исключениями) это не имеет значения, что облегчает пропитку таких обмоток.

Пропиточные материалы делятся на две группы:

1) компаунды, к которым относятся битумы, битумно-масляные лаки, воскообразные материалы, а также синтетические лаки без растворителей. Компаунды при пропитке находятся в жидком состоянии и застывают при охлаждении (термопластичные) или в результате происходящих в них при нагреве химических изменений (термореактивные) переходят в неплавкое и нерастворимое состояние (полимеризуются). Большинство компаундов имеет большую вязкость. Поэтому пропитка ведется под вакуумом с последующим повышенным давлением. Этот процесс может выполняться только в заводских условиях;

2) электролаки с растворителями в условиях мелкосерийного производства нашли более широкое применение. Эти лаки состоят из основы (пленкообразующие или нелетучие) и растворителя (летучие). Количество летучих составляет 40—60%. При пропитке и испарении летучих основа лака заполняет поры не полностью. Пропитку приходится повторять несколько раз, при этом каждая последующая становится более покровной, чем пропитываемой. При первых пропитках теплопроводность и теплоотдача повышаются, при последующих несколько снижается за счет увеличения толщины слоя лака на поверхности обмотки.

Для пропиток можно рекомендовать лак марки 321т (ВТУОАВ 504-015), имеющий температуру сушки 105°C, и лак марки ПФЛ-8а (ТУОАВ 504-022) с температурой сушки 125°C. Оба лака водоземulsionные, предназначены для обмоток классов нагревостойкости А, Е, В для нормального, усиленного влаго- и химостойкого исполнения. Эти лаки рекомендуются для пропиток обмоток с эмаль-изоляцией. Лак марки МЛ-92 (МГМ-16, ВТУ 13-57) с температурой сушки 120—130°C предназначен для обмоток классов нагревостойкости А, Е, В, F, не рекомендуется для проводов типа ПЭВ-2, пригоден для проводов с эмалевой изоляцией классов нагревостойкости В, F и может применяться для обмоток химостойкого и тропического исполнения. Лаки К-47 (ТУ МХП 658-55) и К-57 (ТУ ВЭИ 25-57) термореактивные, имеют температуру сушки ступенчатую: 100—120°C и 160—200°C; по нагревостойкости они относятся к классу Н, тропикоустойчивы [Л. 2].

До пропитки следует производить сушку обмоток, выполненных с хлопчатобумажной изоляцией, при тем-

пературе 100—105 °С в продолжение 1 ч. При применении водоэмульсионных лаков предварительная сушка не требуется. Для пропитки обмотка, нагретая до 70—80 °С, погружается в лак на 10—15 мин (при хлопчатобумажной изоляции — до 20—30 мин).

Сушка обмоток производится в сушильных шкафах конвекционным способом обдувкой горячим воздухом. Применяют также сушку инфракрасным излучением лампами марок ЭС-1А, ЭС-2А, ЭС-1, ЭС-2, ЭС-3. Мощность ламп ЭС-1А и ЭС-2 250 Вт, остальные лампы имеют мощность 500 Вт, напряжение 127 В.

При конвекционном способе сушки испарение летучих начинается с поверхности: создается пленка, препятствующая выходу летучих из глубин обмотки. При инфракрасной сушке прогревается вся обмотка и испарение летучих происходит по всей толще обмотки, что значительно сокращает время и повышает качество сушки. Этот способ сушки при мелкосерийном производстве является наиболее простым и экономичным.

За рубежом применяется метод Зондероля, по которому обмотка нагревается на 10 °С выше температуры кипения растворителя и погружается в лак. При проникновении лака в поры растворитель улетучивается, повышается заполнение пор основой лака и после пропитки обмотка почти не содержит летучих. Значительно ускоряется последующая сушка обмотки. Согласно испытаниям, проведенным в Чехословакии [Л. 2], время сушки после пропитки (для крупных машин) сокращается с 10—15 до 1—2 ч, при этом обмотки более долговечны, чем пропитанные погружением. Эмаль-изоляция должна быть стойка к действию растворителей и к тепловому удару; кроме того, должна быть значительная разница между температурами кипения и самовоспламенения растворителя.

В табл. 7 приведены данные некоторых растворителей [Л. 2]. Для одинаковых марок лака иногда применяются различные растворители, вид растворителя указывается в паспорте лака.

Для обмоток т. м. м. обычно достаточно одной пропитки. Вторую пропитку можно выполнять как покровную тем же лаком. Для влаго- и химостойких исполнений следует дополнительно применять покровные эмали. Эмаль марки ГФ-92ГС (СПД), ГОСТ 9151-59, имеет температуру сушки 105—110 °С, рекомендуется для тро-

пического исполнения, может быть применена для химостойкого исполнения по классу В (и ниже).

Как покровные могут быть использованы следующие эпоксидные компаунды: марок Д-2, ЭД-6 по ВТУ М646-55, классов Е, В с $\rho_V = 7 \times 10^{14}$ Ом·см; эпоксиднополиэфирные компаунды КЭП-1, Э-37 по ВТУ МХП П-47-57, классов Е, В с $\rho_V = 10^{14}$ Ом·см; полиэфирный компаунд МБК ТУ ЭП 51-1-56, классов А, Е с $\rho_V = 10^{13}$ Ом·см

Т а б л и ц а 7

Растворитель	Температура кипения, °С	Температура самовоспламенения, °С
Ацетон	56	630
Бензол	80	580
Бензин	80—120	230—260
Дихлорэтан	83	413
Керосин	180—315	300
Ксилол	136,5—141,5	500
Скипидар	150—180	252
Сольвент 1-го сорта	120—160	—
Сольвент 2-го "	188—250	—
Уайт-спирит	165—200	—
Метиловый спирт	65	475
Бутиловый "	116	366
Этиловый "	78	404

и др. Они тропикостойки, морозостойкость их хуже вследствие меньшей эластичности. Недопустимы для покрытия пластин стали, а также трансформаторов в сборе (с магнитопроводами), приводят к повторной значительной механической напряженности стали.

К клеящим лакам относятся: карбонильный клей, клей БФ (марок БФ-2—БФ-6), а также некоторые лаки. Высокой клеящей способностью обладают глифта-левые лаки. Бакелитовый лак рекомендуется для склейки и пропитки каркасов из гетинакса и текстолита. Этот лак применяется также как пропиточный. Основное его назначение — покрытие пластин стали. Последнее рекомендуется выполнять распылением с повышенным количеством летучих, при этом лак проникает в поры окалины, хорошо схватывается с металлом и служит как защитой от влаги, так и электроизоляцией от вихревых токов. Применять густой лак не рекомендуется, плохо заполняются поры в окалнине, кроме того, снижается k_M

стали магнитопровода. Для быстрой склейки часто применяют шеллачный лак, имеющий очень высокую клеящую способность, но при наличии тонких проводов его применять не следует ввиду его несколько повышенной гигроскопичности и кислотности; кроме того, шеллачный лак дорог.

Воскообразные материалы, являясь гидрофобными, обеспечивают высокую влагостойкость пропитанных ими изделий и высокие электрические свойства. Влагопоглощаемость этих материалов практически равна нулю. Их недостатком является большая усадка при остывании, приводящая к появлению пузырьков воздуха в пропитываемых изделиях, и невысокая температура плавления. Целесообразно их применение при изготовлении трансформаторов для сырых помещений (насосные, котельные и др.).

Парафин имеет температуру плавления $50-55^{\circ}\text{C}$, $\rho_v = 10^{15} \div 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, церезин имеет температуру плавления $57-80^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от марки), $\rho_v = 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Церезин дает меньшую усадку, чем парафин, температура его плавления выше, он меньше окисляется при нагреве. Все это обеспечило церезину более широкое применение, несмотря на его более высокую стоимость. Его рекомендуется применять для пропитки обмоток трансформаторов и картонных каркасов. Озокерит имеет температуру плавления $65-84^{\circ}\text{C}$, головакс — $93-130^{\circ}\text{C}$, но их электрические свойства ниже ($\rho_v = 10^{13} \div 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Их можно применять для проварки картонных каркасов, деревянных крепежных деталей. Часто применяют комбинированные компаунды из указанных материалов, а также с добавлением канифоли и других компонентов.

Воскообразные материалы относятся к небольшому числу компаундов, которые могут быть применены в мелкосерийном производстве.

4. КАРКАСЫ, ОБМОТКИ

Теплопроводность обмоток и охлаждение т. м. м. Мощность т. м. м. повышается с повышением плотности тока. Допустимая плотность тока определяется балансом тепла, выделяемого током в обмотке (I^2R) и отдаваемого поверхностью в воздух. Теплопро-

водность меди бесконечно велика по сравнению с теплопроводностью всех диэлектриков. Поэтому теплопроводность обмотки определяется в основном теплопроводностью изоляции провода, прокладок и прослойк воздуха.

На рис. 13 дано примерное распределение температуры в толще обмотки при проводах в хлопчатобумажной и эмаливой изоляции (без пропитки).

Пропитка обмоток лаками как в волокнистой изоляции, так и в эмаливой значительно снижает влияние

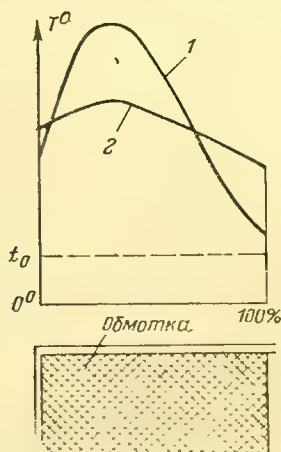


Рис. 13. Распределение температуры нагрева провода по толщине обмотки.

1 — хлопчатобумажная изоляция (непропитанная); 2 — изоляция из эмали-лака; t_0 — температура воздуха.

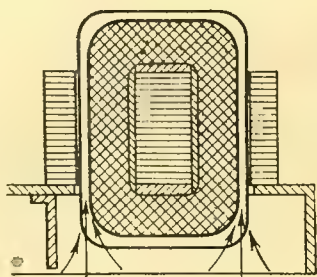


Рис. 14. Трансформатор с повышенной теплоотдачей.

Стрелки показывают направление охлаждающего воздуха.

прослойк воздуха, в особенности при пропитке на кремнийорганической основе, и значительно повышает теплопроводность обмотки. Лаки (гидрофобные) придают пропитываемым материалам водоотталкивающие свойства. При этом повышается влаго- и химостойкость обмоток и значительно снижается старение материалов.

Пропитку обмоток следует применять при работе их в сырых помещениях и в местах с активными газами, при работе в форсированных режимах, а также при предъявлении к ним повышенных требований надежности.

Повышая теплопроводность, необходимо обеспечить и соответствующую теплоотдачу, так как без этого повышенная теплопроводность снизит лишь максимальную температуру за счет ее выравнивания в толще обмотки.

При больших плотностях тока должны быть приняты меры для повышения конвекции тепла. В таких случаях недопустимо покрывать обмотку лакотканью и тем более кабельной бумагой. Покрытием является слой лака 0,1 мм (не более 0,15 мм).

На рис. 14 приведен разрез т. м. м. с повышенной теплоотдачей, установленный на шасси. Между обмоткой и сталью имеется зазор. При нагреве обмотки в зазоре создается тяга воздуха, тем более интенсивная, чем выше температура обмотки и больше толщина магнитопровода. При установке над т. м. м. кенотрона или других тепловыделяющих элементов (например, гасящих сопротивлений в цепи напряжения, располагаемых обычно в поддоне) тяга усиливается. Уже при скорости 0,5 м/с обдув весьма эффективен и допускает повышение плотности тока.

Если раньше при проводах в хлопчатобумажной изоляции поверхность охлаждения превышала $40 \text{ см}^2/\text{Вт}$, то при современных проводах и материалах не представляет затруднения обеспечить хорошие теплопроводность и теплоотдачу при поверхности охлаждения $15 \text{ см}^2/\text{Вт}$. Площадь охлаждения обычно принимается по наружной стороне обмотки (без торцевых сторон). При этом предполагается, что сталь имеет температуру более низкую, чем обмотка (что соответствует современным сталям с малыми потерями).

Можно дополнительно снизить необходимую площадь охлаждения, но при этом вопросы теплоотдачи имеют значение, не меньшее, чем теплопроводность, и в каждом конкретном случае они решаются различно.

Каркасы. Обмотки т. м. м. обычно выполняются на каркасах. В заводских условиях их часто выполняют прессованными из пресс-порошков, которые имеют те или иные электрические, механические и физические свойства. При мелкосерийном производстве каркасы часто изготавливают из слоистых пластиков — гетинакса, текстолита, иногда применяют картон (марок ЭВ, ЭВТ). В основном применяют гетинакс.

На рис. 15 даны образцы заготовок для каркасов. Гетинакс и текстолит хорошо поддаются обработке. При

малой толщине штампуются в холодном виде, при толщине 3—4 мм требуется предварительный подогрев до 100—120 °С.

При механической обработке гетинакса, текстолита изоляционные свойства их резко ухудшаются. Повреждается тонкий слой лака, которым покрываются листы для снижения гигроскопичности; кроме того, обнажаются торцы деталей, а вдоль листов гигроскопичность

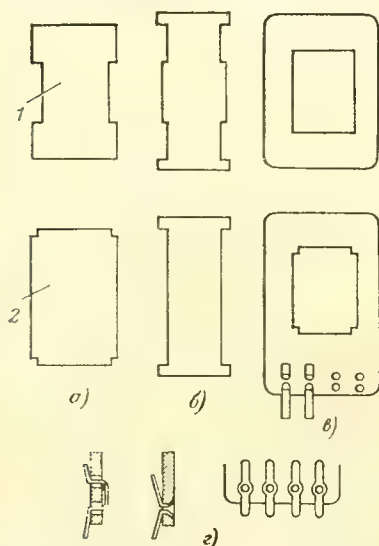


Рис. 15. Заготовки для каркаса.

а, б — детали гильзы; в — щеки; г — различное выполнение выводов;
1 — более жесткий каркас; 2 — упрощенный.

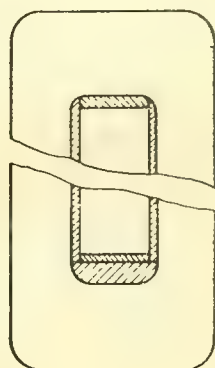


Рис. 16. Варианты закруглений углов гильзы.

и влагопоглощаемость значительно повышены (особенно гетинакса). Для восстановления изоляционных свойств детали предварительно очищаются от пыли обдувом сжатым воздухом и обезжириваются погружением в авиационный бензин или ацетон с просушкой в сушильном шкафу. Затем каркасы в собранном виде пропитываются бакелитовым лаком (или клеем БФ-2) с последующей сушкой при температуре 120—140 °С для полимеризации лака.

Обычно для гильзы каркаса применяется гетинакс одинаковой толщины. Однако для детали, показанной на рис. 15,б, лучше применять гетинакс повышенной

толщины. После сборки углы гильзы закругляют. При повышенной толщине сторон гильзы можно увеличить закругление (рис. 16), что уменьшит вспучивание обмотки и повысит коэффициент заполнения меди k_m в окне магнитопровода, при этом повышается и теплопроводность.

Для т. м. м. мощностью 300—1000 Вт в зависимости от диаметра провода целесообразно для увеличения радиуса закругления применять гетинаксовые вкладыши.

При изготовлении т. м. м. выводы обмоток часто выполняются на щеках каркаса в виде приклепываемых лепестков («петушков») или полосок латуни, как показано на рис. 15. Иногда при большом числе выводов их выполняют на планках, укрепленных на т. м. м., или при малом числе — гибкими концами с цветной маркировкой для непосредственного монтажа.

Иногда выполняют каркасы секционными (рис. 17). Двухсекционные каркасы часто применяют в двухтактных выпрямителях и усилителях. Основное преимущество таких каркасов — сниженное межслойное напряжение, недостаток — невозможность применения прессованных каркасов и сложное изготовление качественного каркаса.

Обмотки. Основной вид намотки — рядовая, выполняется на намоточных станках, некоторые конструкции которых приведены в [Л. 13]. Обычно нижним пределом рядовой намотки является провод диаметром 0,1—0,15 мм (в зависимости от качества станка). Верхний предел 0,8—1,0 мм. Для проводов большого диаметра применяют мощные и тихоходные станки.

Наиболее часто применяют сплошные рядовые намотки. Но при значительном межслойном напряжении приходится применять межслойные прокладки. Иногда применяют кабельную бумагу, обеспечивающую хорошее выполнение рядов, но при этом снижается заполнение каркаса и теплопроводность обмотки. В качестве прокладок применяют тонкую бумагу (пропиточную) или

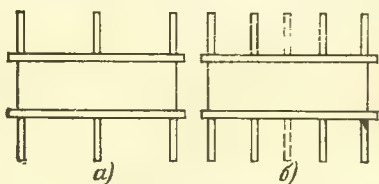


Рис. 17. Секционированный каркас.

a — двухсекционный; *б* — трехсекционный. Пунктиром дана дополнительная переборка.

тонкую лакоткань по ширине каркаса. В начале слоя провод, следуя за неровностями предыдущего слоя, прижимает прокладку и смещает ее против направления намотки. При этом повышается заполнение окна, уменьшаются воздушные прослойки, что повышает теплопроводность обмотки. Но за счет смещения изоляции в конце слоя обмотка обнажается и требуется дополнительная изоляция.

Более целесообразно изоляцию слоев выполнять тонкой лакотканью, отрезанной по диагонали. Полоску наматывают спирально (рис. 18), отступив от начала слоя на 40—50% его ширины (в зависимости от меж-

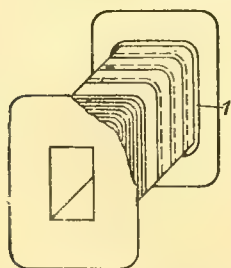


Рис. 18. Покрывание слоев обмотки лейтой.

1 — напуск ленты на щеку каркаса.

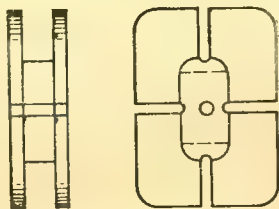


Рис. 19. Шаблон для галетной намотки.

(Пунктиром показан размер стержня магнитопровода, передняя щека шаблона снята)

слойного напряжения), со слабым натяжением, так как лакоткань, отрезанная по диагонали, легко вытягивается и повреждается ее лаковый слой. Последний оборот несколько находит на противоположную щеку каркаса и подклеивается к ней бакелитовым или другим лаком. Аналогично покрывается обмотка и полоской пропиточной бумаги. Может быть применена шелковая ткань, также отрезанная по диагонали. Ткань дает хороший напуск на щеки каркаса. Такая обмотка хорошо воспринимает последующую пропитку. Прокладки можно выполнять пленочными материалами, но при этом последующая пропитка затруднена и должна выполняться только под вакуумом.

В ряде случаев (в основном для специальных т. м. м.) применяют галетные намотки. Вместо каркаса изготавливается только гильза. Обмотки наматывают на

шаблоны (рис. 19). Щеки шаблона изготавливаются из гетинакса или латуни, болванка делается по толщине галеты. Ширина берется несколько большая, чем ширина гильзы (с учетом оплетки лентой). Верх и низ делаются по полуокружности либо по полуовалу, что повышает плотность намотки и при оплетке лентой снижает утолщение ленты по внутренним углам галет. Прорезы в шаблоне предназначены для увязки обмотки и предохранения от распускания до оплетки лентой. По

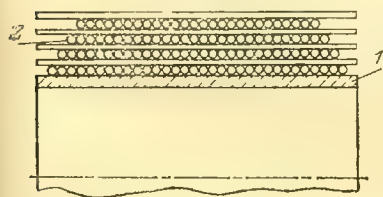


Рис. 20. Бескаркасная намотка обмоток.
1 — гильза; 2 — обмотка.

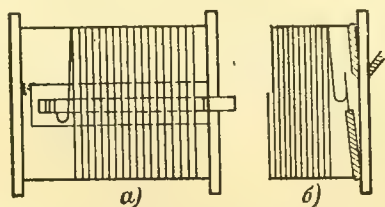


Рис. 21. Выполнение выводов.
а — полоской фольги; б — гибким выводом.

наружному выводу должно быть видно направление намотки во избежание неправильной сборки.

На рис. 20 дан другой вид бескаркасной обмотки с прокладками в каждом слое. Эта обмотка может выполняться на повышенные напряжения. В этих случаях применяют обычно провод ПЭЛШО с прокладками из пропиточной или намоточной бумаги. Такая обмотка, как и галетная, может пропитываться в процессе намотки либо в готовом виде. Выбор лака или компаунда зависит от технических требований.

При выполнении обмоток тощим проводом обычно вывод выполняют полоской фольги или гибким выводом (рис. 21). Первые два-три оборота следует выполнять с незащищенной изоляцией, место зачистки прокрашивать лаком и обязательно давать указанную слабину, плотно увязывая провод ниткой. Это один из малых вопросов надежности, весьма существенных для аппаратуры, одним из основных требований которой является безотказность.

На обмотках, постоянно находящихся под напряжением, были случаи обрыва провода даже при диаметре до 0,15 мм с пайками, выполненными внатяжку. Провод, ослабленный зачисткой и коррозией в месте пайки,

за счет расширения обмотки при нагреве надламывался, что приводило к обрыву.

Технология изготовления обмоток подробно рассматривается в [Л. 13].

5. ГАБАРИТНАЯ МОЩНОСТЬ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ И ГЕОМЕТРИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

В расчетном выражении (8) принято за основу произведение сечения стали магнитопровода на сечение окна $S_c S_o$. Но обычно начинают расчет с выбора сечения стали S_c . В выражении (8) в левой части четыре геометрические величины (b, h, a, d), в правой четыре магнитоэлектрические и технологические величины (B, k_m, Δ, η_t) требуют уточнения. Исходным является только P_1 (или P_2), решение может быть различным.

Например, приняв при заданной мощности P_1 сечение стали 10 см², при нормали НО.666.000 можно применить магнитопроводы типов Ш20×50, Ш25×40, Ш32×32. Приняв тип Ш20×50, выбирают значение параметров правой части выражения (8) часто необоснованно и производят ориентировочный расчет обмоток. Если в окне магнитопровода требуемое число витков не помещается, переходят на повышенный размер пластин, обычно при том же сечении стали. В этой нормали коэффициент прогрессии 1,25, следовательно, размер окна увеличится более чем на 50%, что может быть излишним и привести к целесообразности уменьшения сечения стали (при увеличенной ширине стержня). Получается метод последовательного приближения, а не расчет по произведению $S_c S_o$.

Выбор сечения стали случаен и не дает дальнейшего направления расчета, нельзя даже обоснованно по мощности определить сечение проводов, так как неизвестна допустимая плотность тока. Получается как бы одно уравнение со многими неизвестными.

Такие расчеты были допустимы, когда т. м. м. изготавливались в ограниченном количестве, в основном силовые т. м. м. на мощности 40—250 Вт нормального выполнения, т. е. работающие в отапливаемых помещениях и без дополнительных ограничений, рассчитываемые по усредненным характеристикам стали.

В настоящее время, когда т. м. м. изготавливаются в больших количествах, значительно отличаются по мощности и техническим условиям, такие расчеты недостаточны.

Габаритная мощность. Предварительный расчет трансформатора с достаточной точностью можно вести не по первичной (или вторичной), а по габаритной

мощности:

$$P_r = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{P_1}{2} (1 + \eta_r) = \frac{P_2}{2} \left(1 + \frac{1}{\eta_r}\right). \quad (13)$$

При этом предполагается, что имеются две обмотки с одинаковыми параметрами, занимающие каждая половину окна.

В выражении (8) значение мощности заменим габаритной мощностью P_r :

$$S_o S_c = \frac{P_r}{B k_M \Delta}.$$

Расчетное выражение. С введением нормалей на размеры пластин целесообразно начинать расчет с выбора пластины стали по принятой на производстве нормали, т. е. с сечения окна S_o . При этом известна уже и ширина стержня, не известна лишь толщина магнитопровода, т. е. сечение стали. Из сказанного в § 2 следует, что м. д. с. определяется длиной магнитной линии и не зависит от толщины магнитопровода. Следовательно, при одинаковой индукции м. д. с. для каждого размера пластин остается неизменной, определяемой параметрами пластин магнитопровода независимо от его толщины. В рекомендациях по расчету т. м. м. часто приводят усредненные значения k_M для каждого размера пластин также независимо от толщины магнитопровода, но снижающиеся с уменьшением размера пластин [Л. 1]. Можно принять (без большой погрешности) неизменной и плотность тока Δ .

Ниже даются примеры выбора пластин по нормали, определения толщин магнитопровода, расчета допустимой плотности тока и дополнительные обоснования этого метода расчета.

Заменим $S_o S_c$ их множителями $b h d a$. Введем расчетный коэффициент $K_p = (B k_M \Delta)$ и оставим в левой части выражения значения a , см:

$$a = \frac{P_r}{K_p b h d}. \quad (14)$$

Выражение (14) с учетом K_p включает те же компоненты, что и выражение (8). Но в (8) компоненты, являясь расчетными, случайны, не имеют взаимосвязи и не увязаны с геометрическими размерами. При коэффициенте K_p они являются корректировочными и выбираются с учетом технических условий.

При расчетах по усредненным характеристикам силовых т. м. м. нормального исполнения для средних размеров пластин при нормальных по приложению 1 коэффициент K_p близок к единице (0,9—1,05). Принимаем K_p за единицу и P_1 за P_r (что для средних и больших размеров пластин допустимо). В числитель выражения (14) вводим мощность P_1 , а в знаменатель вводим соответствующие размеры выбранной пластины и находим толщину магнитопровода. Проверив два-три размера, определим требуемый размер пластины и ориентировочную толщину магнитопровода для выбранной пластины. В приводимом ниже примере примем нормаль ИИО.010.005.

Пример 1. Выбрать размеры пластин для т. м. м. на мощность $P_1=180$ Вт. К нормали ИИО.010.005 соотношение размеров не выдержано. Размеры b , h , d берем по приложению 2. Определяем для нескольких смежных размеров пластин значение знаменателя (b , h , d). Для УШ40 $2,6 \cdot 7,2=75,0$; для УШ35 — 47,5; для УШ30 — 30,0; для УШ26 — 20,7 см³. Принимаем $P_1=180$ Вт за P_r . Получаем толщину магнитопровода на пластинах УШ40 $a=180/75=2,4$ см; на УШ35 — 3,8 см; на УШ30 — 6 см; на УШ26 — 8,7 см. Допустимо принять магнитопроводы УШ35×38 и УШ30×60. Обычно применяют пластины меньших размеров. Рассмотрим выбор пластин для других т. м. м. При мощности $P_1=100$ Вт можно принять магнитопровод УШ26×50, при $P_1=80$ Вт — УШ26×40 и т. д.

Но размеры a требуют корректировки.

Коэффициент K_p состоит из двух независимых множителей: индукции B и $k_m \Delta$. Выбор индукции рассматривается в § 6. Произведение $k_m \Delta$ рассматривается как один параметр. Обозначим его K'_p . При неизменной поверхности охлаждения увеличение k_m (и массы меди) приводит к необходимости снижать плотность тока, при уменьшении k_m допустимая плотность тока повышается. Получается компенсация, но не полная, так как эта зависимость квадратична.

При увеличении размеров т. м. м. (размера пластин) поверхность охлаждения увеличивается меньше, чем объем (масса) меди. При этом, несмотря на увеличение k_m ,

$$K'_p = k_m \Delta$$

значительно уменьшается, K_p снижается до 0,8 и ниже.

Усредненные значения k_m для каждого размера пластин приведены в приложениях 1 и 2.

В последующем тексте приводятся расчеты объема и массы меди и допустимой плотности тока с учетом

потерь в меди и поверхности охлаждения. Ниже рассмотрим возможность предварительного расчета плотности тока и потерь в меди до проведения полного расчета т. м. м.

Геометрией трансформатора именуется основные соотношения размеров магнитопровода — ширины и толщины стержня, ширины и высоты (длина) окна пластин и размеры обмоток (при полном заполнении окна пластины). В большинстве нормалей, как правило, для всех типоразмеров соотношение геометрических размеров пластин неизменно. Принимаем ширину стержня d за базовый размер. Остальные три размера можно выразить в безразмерных коэффициентах [Л. 1, 4]:

$$\left. \begin{aligned} b &= xd; \quad h = yd; \quad a = zd; \\ x &= b/d; \quad y = h/d; \quad z = a/d. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Геометрия трансформатора, так же как и выражение (8), не учитывает некоторые отклонения от нормалей, как, например, уширение ярма и др. Иначе расчеты осложняются. Некоторые отклонения при необходимости легко корректируются.

В табл. 8 для трансформаторов БТ в столбце 3 даны значения базового размера d , являющегося множителем для выражений столбца 2, а также и для столбца 4, где дано частное решение для нормали НО.666.000 ($x=1$, $y=2,5$) для значений $z=1$ и 2,5. Столбец 5 отношения к геометрии не имеет, предназначен для решения отдельных магнитопроводов, для которых определять безразмерные коэффициенты нецелесообразно. Размеры для каждой пластины (магнитопровода) берутся в сантиметрах. Столбец 5 согласуется только со столбцом 1 (параметры).

Расчет трансформатора производится по выражению (14).

В табл. 8 приведены объемы стали V_c и обмотки V_k (катушки), по которым определяется масса стали и меди.

Масса стали при $k_c=0,9$ и $\gamma_c=7,55$ определяется по выражению

$$G_c = V_c k_c \gamma_c 10^{-3} = V_c \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

При решении по столбцу 2 и 4 объем V_c вводится с учетом базового размера. Частное решение (столбец 4)

при $z=1$ или 2,5 соответственно будет равно или 0,061, или 0,1525.

Масса меди при $\gamma=8,9$ определяется по выражению

$$G_M = V_K k_M \gamma_M 10^{-3} = V_K 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Частное решение (столбец 4) 0,159 k_M и 0,226 k_M .

При решении по столбцу 5 объемы V_c и V_K рассчитываются по столбцу 5.

На производстве, где принята определенная нормаль (с выдержанными соотношениями геометрических вели-

Таблица 8

Параметры	Выражение в общем виде для БТ	Базовый размер d , см	Частное решение (нормаль ИО.666.000) при $x=1, y=2,5$		Выражение в буквенных обозначениях (см. рис. 5)
			$z=1$	$z=2,5$	
l_c	$2(x+y+\pi, 4)$	d	8,57	8,57	$2\left(b+h+\frac{\pi}{4}b\right)$
l_r	$2(x+y+1)$	d	9	9	$2(b+h+d)$
l_K	$2(\pi/2x+1+z)$	d	7,14	10,14	$2\left(\frac{\pi}{2}b+d+a\right)$
S_o	xy	d^2	2,5	2,5	bh
S_c	z	d^2	1	2,5	da
$S_o S_c$	xyz	d^4	2,5	6,25	$bhda$
V_c	$2(x+y+1)z$	d^3	9	22,5	$2(b+h+d)da$
V_K	$2xy\left(\frac{\pi}{2}x+1+z\right)$	d^3	17,85	25,35	$2bh\left(\frac{\pi}{2}b+d+a\right)$
Π_K	$2y(\pi x+1+z)$	d^2	25,7	33,2	$2h(\pi b+d+a)$

Обозначения: l_c, l_r, l_K —длины соответственно средней магнитной, геометрической линии и среднего витка катушки; V_c, V_K —объемы стали и катушки; Π_K —поверхность охлаждения обмотки (без торцов).

чин), рекомендуется вести расчет по безразмерным коэффициентам.

В таком случае расчетное выражение примет вид:

$$z = \frac{P_r}{K_p x \mu d^3}. \quad (16)$$

Габаритная мощность условная. Так как в нормальных все линейные соотношения при снижении базового размера остаются неизменными, часто полагают, что подход к их расчету, независимо от размеров пластин, одинаков. Однако, как видно из табл. 8, при

уменьшении базового размера (и длины l_c) в 4 раза (Ш40—Ш10), площадь окна и сечение стали уменьшаются в 16 раз, объем стали и обмотки — в 64 раза, произведение $S_o S_c$ — в 256 раз. Следовательно, количественные соотношения электромагнитных параметров изменятся значительно, что отразится на их расчете. Существенно установить соотношения электромагнитных параметров с геометрическими. В зависимости от размеров (мощности) т. м. м. электромагнитные параметры принимаются различными. Но их для сравнения целесообразно принять неизменными. Действительные параметры определяются последующей корректировкой, обоснованной техническими условиями.

В выражении (16) в коэффициенте $K_p = B(k_m \Delta)$ введем следующие допущения: $B = 1,0$ Т, $k_m = 0,4$, $\Delta = 2,5$ А/мм². При этом $k_m \Delta = 1$ А/мм², что соответствует плотности тока в окне магнитопровода 1 А/мм². Заметим, что значение сомножителей может быть другим, например $k_m = 0,3$, $\Delta = 3,33$ А/мм². Желательно их округление для упрощения расчетов, поскольку эти значения выпадают при корректировке.

Мощность P_r при принятых условиях назовем габаритной условной мощностью (P_y). Выражение (16) примет вид, Вт:

$$P_y = x y z d^4. \quad (17)$$

Дополнительно примем потери в стали 1 Вт/кг, что примерно соответствует сталям марок Э43 — Э43А толщиной 0,35 мм, Э320 толщиной 0,5 мм. Обратим внимание, что значения P_r и P_y при применении марок стали с разными потерями, но неизменном значении $B = 1,0$ Т не изменятся. Изменяются потери P_c и P_s , η_t и как следствие мощности P_1 и P_2 .

При коэффициенте K_p [выражения (14) и (16)], близком к единице, условная мощность является ориентировочной, корректируемой по допустимой плотности тока и принятой индукции. Коэффициент k_m определяется технологией производства и техническими требованиями.

В последующем тексте сохраним термин «условная мощность», так как многие специальные т. м. м. не трансформируют мощность, а выполняют другие функции (§ 7) и их габариты можно оценивать лишь по условной мощности P_y .

Электромагнитные параметры в геометрии трансформатора. На базе выражения (17) и принятых допущений составим для нормали НО. 666. 000 (с учетом табл. 8, столбцы 4 и 3) таблицу электромагнитных параметров (табл. 9). Параметры приводятся для

Таблица 9

Типоразмер пластины	z	Мощность, P_y , Вт	Масса стали, кг	P_c , кг	P_c/P_y , %	Масса меди при $k_M=0,4$, кг	P_M при 2,5 А/мм ² , Вт	P_M/P_y , %	Поверхность охлаждения, см ²		Допустимые потери $P_K/15$ см ² , Вт
									на 1 Вт	обмотки	
Ш40	2,5	1600	9,8	9,8	0,61	5,78	72,2	4,5	7,35	530	35,3
Ш40	1	640	3,9	3,9	0,61	4,67	50,8	8,0	8,1	411	27,4
Ш32	2,5	650	5,0	5,0	0,77	2,96	37,0	5,3	9,2	340	22,7
Ш32	1	260	2,0	2,0	0,77	2,08	26,2	9,0	10,1	263	17,6
Ш25	2,5	245	2,38	2,38	0,98	1,41	17,7	7,2	11,8	207	13,8
Ш25	1	98	0,95	0,95	0,98	0,992	12,4	12,6	12,9	160	10,7
Ш20	2,5	100	1,22	1,22	1,22	0,722	9,03	9,0	14,8	133	8,87
Ш20	1	40	0,49	0,49	1,22	0,508	6,35	16,0	16,1	103	6,9
Ш16	2,5	41	0,63	0,63	1,53	0,370	4,62	11,0	18,4	85	5,67
Ш16	1	16,4	0,250	0,25	1,53	0,260	3,24	20,0	20,3	65,8	4,37
Ш12	2,5	13	0,264	0,264	2,03	0,153	1,94	15,0	24,4	47,9	3,19
Ш12	1	5,2	0,105	0,105	2,03	0,109	1,37	25,0	27	37,0	2,47
Ш10	2,5	6,25	0,153	0,153	2,45	0,0903	1,13	18	29,3	33,2	2,22
Ш10	1	2,5	0,061	0,061	2,45	0,0636	0,8	32	32,3	25,7	1,72
Ш9	1	1,64	0,044	0,044	2,73	0,0465	0,58	35,4	36	21	1,4

значений $z=1$ и 2,5. К нормали добавлен размер Ш10, часто применяемый на производстве.

Потери в стали приняты 1 Вт/кг, поэтому значения массы и потерь совпадают. Действительные потери корректируются достаточно просто: при марке стали Э42 умножаются на 1,2, при Э330 — на 0,5, т. е. снижаются вдвое. Потери изменяются пропорционально квадрату изменения индукции B . Отклонения от принятого коэффициента $k_c=0,9$ возможны, но значительно меньше, чем допуски параметров стали (по ГОСТ). Помимо того, максимально допустимые (по ГОСТ) потери значительно меньше потерь в меди (табл. 9).

Допустимая плотность тока определяется балансом тепла, выделяемого в обмотках, теплопроводностью обмоток, конвекцией тепла в воздух и теплостойкостью применяемых материалов.

Наиболее широко применяются силовые т. м. м. нормального исполнения. Для них принята поверхность

охлаждения Π_k не менее 15 см²/Вт. В табл. 8 величина Π_k определяется по наружной поверхности обмотки без учета нагрева стали (при марках стали Э42 и лучших), для упрощения не учитываются торцы обмоток.

Потери в меди являются основными потерями, определяющими к. п. д. трансформатора, поэтому плотность тока надо выбирать обоснованно. Такие параметры, как потери в меди, ΔU и др. определяются обычно после расчета и выбора чисел витков и сечения проводов. Более целесообразно рассчитывать параметры предварительно в общем виде, что помогает сориентироваться в правильном выборе параметров с учетом технических требований.

Определить допустимую плотность тока (А/мм²) можно по допустимым потерям и объему меди по известному выражению

$$P_M = V_M \cdot 0,0175 I^2,$$

где V_M выражено в кубических сантиметрах. Допустимые потери и объем меди достаточно просто определяются по геометрии т. м. м. (табл. 8 и 9):

$$I = \sqrt{\frac{P_M}{0,0175 V_M}} \quad (18)$$

или

$$I = \sqrt{\frac{P_M \cdot 57}{V_M}}. \quad (18')$$

Полученное значение равно допустимой плотности тока.

Можно расчет вести по массе меди. Для этого объем меди умножим на 8,9 и на 10⁻³, поскольку масса определяется в килограммах. Но чтобы не нарушить размерность, умножим и знаменатель. Кроме того, заменим коэффициент 0,0175 на 0,0178, который соответствует температуре меди при 25 °С:

$$P_M = \frac{0,0178 \cdot I^2 V_M 8,9 \cdot 10^{-3}}{8,9 \cdot 10^{-3}} = I^2 \cdot 2G_M.$$

Приводим расчетное выражение:

$$I = \sqrt{\frac{P_M}{2G_M}}. \quad (19)$$

Выражение (19) соответствует потерям в меди при $t = 25$ °С. При повышенных температурах потери повыша-

ются пропорционально K_t :

$t, ^\circ\text{C}$	25	50	75	100	125	150
K_t	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Промежуточным значениям t° соответствует изменение K_t на $\pm 0,02$ на каждые $\pm 5^\circ\text{C}$. Температура обмоток обычно значительно выше, что приводит к увеличению сопротивления и потерь, возрастающих пропорционально приведенному коэффициенту. При ожидаемой $t=100^\circ\text{C}$ в выражение (19) можно ввести коэффициент $2 \cdot 1,3$. На изготовленном т. м. м. по начальному замеру и после включения т. м. м. с нагрузкой (на 2—3 ч) определяются сопротивление и температура на внутренней обмотке.

Пример 2. Приведем расчет допустимой плотности тока для т. м. м. при нескольких размерах магнитопровода по нормали НО.666.000. Для расчета используем данные табл. 8 и 9.

Определим допустимую плотность тока для т. м. м. на магнитопроводе $\Pi 40 \times 100$. Принимаем $k_m=0,4$, поверхность охлаждения $\Pi_k=530 \text{ см}^2$, допустимые потери $P_m=35,3$, масса меди $G_m=5,78 \text{ кг}$. Плотность тока по выражению (19)

$$I = \sqrt{\frac{P_m}{2G_m}} = 1,74 \text{ А/мм}^2,$$

Для $\Pi 40 \times 40$ при $k_m=0,4$ потери $P_m=27,4$, масса меди $G_m=4,07 \text{ кг}$, $\Delta=1,81 \text{ А/мм}^2$.

Для $\Pi 20 \times 50$ принимаем $k_m=0,31$. Плотность тока можно определить по Π_k с учетом k_m , но поскольку в табл. 9 дана масса меди при $k_m=0,4$, то определим пересчетом:

$$G_m=0,722 \cdot 0,31/0,4=0,560 \text{ кг}.$$

При $P_m=8,87 \text{ Вт}$ плотность тока $\Delta=2,82 \text{ А/мм}^2$.

Для $\Pi 20 \times 20$ плотность тока $\Delta=2,96 \text{ А/мм}^2$.

При принятой на производстве другой нормали рекомендуется составить подобную сводную таблицу или выполнить расчеты непосредственно по табл. 8.

Выше было указано на рекомендации принимать для каждого размера пластин одинаковое значение k_m независимо от толщины магнитопровода (в пределах изменения z от 1 до 2,5): кроме того, сказано, что в этом пределе допустимая плотность тока изменяется мало. Проверить это по расчетам допустимой плотности тока не представляется возможным, поскольку погрешности измерений и расчетов могут превышать искомую разницу (расчеты ведутся с трех- и двузначными числами). Более целесообразно выполнить этот расчет по геометрии в общем виде. Допустимые потери пропорциональны поверхностям охлаждения, а объем меди (и масса) при одинаковом k_m пропорциональны объемам обмоток.

Ниже приводим это выражение в общем виде:

$$\frac{\Delta''}{\Delta'} = \sqrt{\frac{I''_{\text{к}} I'_{\text{к}}}{V''_{\text{к}} I'_{\text{к}}}} = \sqrt{\frac{(\pi x + 1 + z'') \left(\frac{\pi}{2} x + 1 + z' \right)}{\left(\frac{\pi}{2} x + 1 + z'' \right) (\pi x + 1 + z')}} ,$$

где z'' и z' — соответственно верхний и нижний пределы толщины магнитопровода.

Ниже дается частное решение при $x=1$, $z=2,5$, $z=1$:

$$\frac{\Delta''}{\Delta'} = \sqrt{\frac{6,64 \cdot 3,57}{5,07 \cdot 5,14}} = \frac{1}{1,05} .$$

При расчете (по столбцу 2) учитывается только часть выражения, заключенная в скобках, остальные множители и все промежуточные пересчеты (и дополнительные погрешности) исключены.

Из приведенного решения следует, что с уменьшением z от 2,5 до 1 допустимая плотность тока повышается на 5% и не зависит от длины окна, поскольку под корнем отсутствует y .

В нормалях (приложение П-1) приведены в соответствии с рекомендациями [Л. 1] усредненные значения k_m , различные для каждого размера пластины. Значения k_m примерно соответствуют требованиям к т. м. м. электронной аппаратуры с тремя — четырьмя вторичными обмотками.

При небольших изменениях k_m , например в сторону уменьшения, допустимая плотность тока несколько повышается, что частично компенсирует снижение k_m (19). При уменьшении толщины магнитопровода при неизменном k_m допустимая плотность тока несколько повышается за счет некоторого повышения отношения поверхности охлаждения к массе меди. Практически можно принять, что k_m для каждого размера пластин — величина постоянная.

При снижении k_m за счет неплотной намотки, наличия вспучивания (при обмотках толщиной более 22—25 мм) повышать плотность тока нельзя, а в ряде случаев необходимо ее снижать, поскольку ухудшается теплопроводность за счет прослоек воздуха в толще обмотки.

В заводских условиях коэффициент k_m каждого изделия строго фиксирован, при кустарном производстве он может колебаться в зависимости не только от технологии, но часто от исполнителя.

Для предварительных расчетов большая точность не нужна, так как сечения смежных проводов отличаются в среднем на 10—15%, что приводит к необходимости повышения сечения проводов и соответственно снижения плотности тока.

При разных диаметрах проводов расчет часто ведут по разным k_m для каждой обмотки. Это излишне. При расчете по усредненному k_m первичная обмотка повышающего т. м. м. (с повышенным k_m) займет меньшую площадь окна, освободив соответствующую часть площади для вторичной обмотки. Так же и при нескольких вторичных обмотках. Как следует из сказанного, особой точности в определении усредненного k_m не требуется. Так же по средней длине витка обмоток ведется расчет меди всех обмоток. Принятые допущения значительно упрощают расчет и делают его более наглядным. При изготовлении даже малой партии т. м. м. обязательно изготавливают опытный образец, на котором уточняют сечения проводов, коэффициент k_m и другие параметры, иногда вносят корректировку в длину среднего витка той или иной обмотки, особенно по отношению обмоток накала, располагаемых обычно поверху. Выше было сказано, что расчетный коэффициент K_p состоит из двух множителей B и K'_p , определяемых независимо друг от друга.

Значения $k_m \Delta$ в значительной степени определяются геометрией трансформатора, что позволило ввести их (в условных значениях) в геометрию т. м. м.

Зависимость магнитоэлектрических параметров от размеров пластин. При неизменной длине магнитной линии, одинаковом количестве стыков, размера и конфигурации пластин и качества стали м. д. с. зависит только от индукции и не зависит от толщины магнитопровода. Для каждого размера пластин произведение $k_m \Delta$ также практически не зависит от толщины магнитопровода. Следовательно, неизменно и отношение расчетных значений тока намагничивания к току нагрузки. В таком случае геометрические и электромагнитные параметры являются как бы паспортом пластин и магнитопровода на этих пластинах. С изменением качества стали и особенно конструкции магнитопровода паспортные данные пластины и магнитопровода могут значительно отличаться (в основном в выборе величины индукции).

Переменными параметрами, зависящими от толщины магнитопровода, являются потери в меди и падение напряжения ΔU , которые увеличиваются с уменьшением толщины магнитопровода, при этом снижается к. п. д. η_t . Габаритная мощность P_T не изменяется. Повышение ΔU ухудшает нагрузочную характеристику, поэтому в средних т. м. м. применение магнитопровода с $z=1$ нежелательно. В больших т. м. м., где потери в меди относительно малы, магнитопроводы со значением $z > 1,5 \div 2$ применяются редко как менее технологичные.

Подгруппы силовых т. м. м. С уменьшением базового размера вследствие степенных зависимостей соотношение электромагнитных параметров значительно изменяется, что отражается на их расчете. При оценке условий расчетов, приведенных выше, можно разбить все т. м. м. на три подгруппы — большие, средние и малые.

Рассмотрим специфику расчета и изготовления этих подгрупп т. м. м.

Большие т. м. м. (например, Ш40) имеют малую поверхность охлаждения по отношению к массе меди, что приводит к значительному занижению плотности тока. Наличие стыков в магнитопроводе приводит к необходимости небольшого снижения индукции. Обычно эти т. м. м. выполняют стержневыми (с двумя каркасами), что увеличивает поверхность охлаждения. Ширину окна следует несколько увеличить для получения зазоров между обмотками и между обмотками и сталью. Часто т. м. м. выполняют вне нормалей, особенно специальные. Расчет начинается с выбора сечения стали и корректируется по длине окна.

Средние т. м. м. (основная подгруппа) имеют поверхности охлаждения, допускающие плотности тока $2,5\text{—}3 \text{ А/мм}^2$. Допустимые потери в меди составляют $7\text{—}15\%$, к. п. д. достаточно высок. Влияние стыков значительно, требует некоторого снижения индукции. Возможно выполнение различных требований.

Потери в меди (и стали), отнесенные выше к мощности P_y (или P_T), точнее относить к P_1 . Замена допустима для больших т. м. м., а для средних т. м. м. — с последующей корректировкой. Эти силовые т. м. м. могут рассчитываться по усредненным характеристикам, если к ним не предъявляются ограничивающие требования.

Малые т. м. м. рассчитывать по усредненным характеристикам не представляется возможным. Влияние

стыков (в процентах) увеличивается пропорционально квадрату снижения базового размера. Допустимая (по P_k) плотность тока велика, и потери в меди могут превышать мощность P_2 (табл. 9). Относить потери к P_y лишено смысла. Величина k_m значительно зависит от толщины магнитопровода и номинального напряжения.

Большинство малых и специальных средних т. м. м. обычно требует инженерного расчета и соответствующей технологии.

Характер соотношения для других нормалей примерно тот же. Возможны некоторые отклонения в сторону меньших или больших значений d и изменения коэффициента K_p .

Эти вопросы рассматриваются ниже.

6. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

При расчете т. м. м. по выражению (8) практически неясно, с какого параметра начинать расчет. Значения параметров по различным рекомендациям, подчас, у разных авторов различаются. В предыдущем тексте расчет начинается с выбора размера пластины по принятой на производстве нормали, т. е. с сечения окна S_o . По выражению (14) определяется ориентировочно толщина магнитопровода. По поверхности охлаждения определяется допустимая плотность тока Δ , расчет которой близок к реальным значениям. Значительно упрощаются расчеты при применении усредненных значений k_m и Δ . Остается выбрать индукцию B , после чего произвести расчет обмоток, выбор сечения проводов, числа витков и выполнить окончательную корректировку толщины магнитопровода и расчет основных параметров (см. пример 4).

Расчет силовых т. м. м. по усредненным характеристикам. Выбор индукции по параметрам, даваемым ГОСТ, не представляется возможным, так как для сталей марок Э11—Э32 напряженность дается в пределах 25—100 А/см, для Э41—Э43 и холоднокатаных Э310—Э330—10—100 А/см, тогда как в т. м. м. напряженность принимается обычно ниже 10 А/см. Поэтому в ряде случаев используются характеристики какого-либо предприятия или рекомендации различных руководств.

Расчет по усредненным характеристикам допустим только для больших и средних силовых т. м. м., не ограниченных техническими условиями.

Усредненные характеристики трансформатора базируются обычно на сталях с минусовыми допусками по индукции и на магнитопроводе с четырьмя стыками (поскольку они чаще применяются). В больших силовых т. м. м. с увеличением длины магнитной линии влияние стыков значительно снижается, что допускает ограничиваться относительно небольшим снижением индукции против индукции насыщения. Их расчет по усредненным характеристикам вполне допустим, поскольку повышенное значение тока I_0 обычно не регламентируется. Трансформатор будет работать нормально, хотя сталь используется не полностью и масса трансформатора завышена. В средних т. м. м. при отсутствии ограничивающих условий также можно вести расчет по усредненным характеристикам.

Индукцию при стали марки Э42 толщиной 0,35 мм для больших т. м. м. обычно принимают 1,25—1,3 (до 1,35) Т, для средних 1,15—1,25 Т. При этом следует ориентироваться не на значение мощности, а на размер пластин, снижая индукцию при переходе от большего к меньшему размеру пластин. Сталь для этих т. м. м. обычно не отжигают. Иногда для средних т. м. м. взамен отжига применяют стали повышенного качества (Э310, Э320), индукцию при этом применяют ту же или несколько повышают ее.

Расчет т. м. м. по геометрии выполняется по безразмерным коэффициентам по выражению (16). Делим заданную мощность P_1 на произведение $x y d^4$ (см. пример 1). Получаем толщину магнитопровода в безразмерном коэффициенте z . Сравним это произведение с выражением (17). При $z=1$ они тождественны. Следовательно, знаменатель в выражении (16) для каждого размера пластин численно равен P_y при $z=1$. Для нормали НО. 666. 000 эти значения даны в табл. 9.

Определение допустимой плотности тока дано в примере 2.

Пример 3. Выберем размер пластин по нормали НО.666.000 для трансформатора мощностью $P_1=120$ Вт и определим его основные параметры.

Ближайшие для заданной мощности по табл. 9 — пластины Ш20 и Ш25 в выражении (16); для первой знаменатель равен 40, для

второй — 98. Предварительно в обоих случаях принимаем $K_p = 1$.

При пластинах Ш20 получаем:

$$z = \frac{120}{40} = 3.$$

Принимаем типоразмер Ш20×60, сталь марки Э42 толщиной 0,35 мм, $B = 1,2$ Т, $k_m = 0,31$.

По табл. 8 и 9 определяем $I_k = 148$ см², потери в меди $P_m = 10$ Вт, $G_m = 0,62$ кг, плотность тока $\Delta = 2,81$ А/мм², $P_m = 8,3\%$, в первичной обмотке $P_m = 41\%$, $\Delta U\% = 4,1\%$, масса стали $G_c = 1,16$ кг, потери в стали $P_c = 2$ Вт, полные потери 12 Вт, к. п. д. $\eta_t = 0,9$, $K_p = 1,2 \cdot 0,31 \cdot 2,81 = 1,05$. Имеется небольшой запас.

Сравним соотношение параметров с т. м. м. на пластинах Ш25.

Для них $z = \frac{120}{98} = 1,22$. Принимаем размер магнитопровода Ш25×Ш32,

$B = 1,23$ Т. Потери в меди $P_m = 11,5$ Вт, несколько повышены (на 15%), но масса меди повышена значительно: $G_m = 0,83$ кг (на 40%), поэтому плотность тока снижена: $\Delta = 2,54$ А/мм². Масса стали примерно одинакова, потери в стали при Ш25 несколько повышены за счет повышения индукции:

$$(1,23/1,2)^2 = 1,05; P_c = 2,1 \text{ Вт.}$$

Полные потери $P_m + P_c = 11,5 + 2,1 = 13$; к. п. д. $\eta_t = 0,86$; $K_p = 1,23 \cdot 0,33 \cdot 2,54 = 1,03$.

Масса т. м. м. на пластинах Ш25 завышена против массы т. м. м. на пластинах Ш20 на 12—13%, объем — на 45%, занимаемая площадь (при горизонтальном расположении на шасси) — на 75%. При требованиях снятия объема следует принимать уменьшенный размер пластины. В некоторых случаях применяют магнитопроводы с размером $z = 3,5$ и более.

При применении т. м. м. на пластинах Ш25 несколько увеличится м. д. с., но число витков увеличится пропорционально уменьшению сечения магнитопровода. При этом значительно уменьшится ток I_0 . Увеличив толщину магнитопровода, можно дополнительно снизить ток I_0 или плотность тока и понизить потери в меди и ΔU .

Все эти расчеты ориентировочны. Последующие корректировки, выполненные с учетом технических требований и выбора сечения проводов, дадут окончательное решение.

В примере 1 рассмотрен ориентировочный выбор размеров пластин для магнитопроводов по заданным мощностям по выражению (14) для единичных т. м. м. Расчет выполнен по нормали НИО. 010. 005, геометрические соотношения которой не выдержаны и рассчитываются как единичные (табл. 8). В примере 2 приведено теоретическое обоснование и дан расчет допустимой плотности тока. Этот пример и последующие выполнены по нормали НО. 000. 666, частное решение которой (по геометрии) дано в табл. 8 и 9. Приведенные параметры принимаются без повторного расчета, недостающие определяются пересчетом или рассчитываются по табл. 8.

Ниже приводится полный расчет силового т. м. м. по заданным вторичным нагрузкам с выбором плотности тока, расчетом чисел витков и выбором сечения (диаметров) проводов.

Пример 4. Рассчитать трансформатор на напряжение 220 В. Вторичные напряжения и токи: 350 В, 0,25 А; 6,3 В, 5 А; 24 В, 0,6 А. Мощность $P_2 = 87,5 + 31,5 + 14,4 = 133,4 \approx 135$ Вт. По нормали НО.666.000 принимаем пластины Ш25, сталь, марки Э42 толщиной 0,35 мм. Расчет ведем по выражению (16). Произведение $xud^4 = 98$, K_p принимаем равным единице. Мощность P_r заменяем на P_1 , но поскольку мощность дана по P_2 , принимаем $\eta_T = 0,9$ и подставляем в выражение (16):

$$z = \frac{135}{0,9 \cdot 98} = \frac{150}{98} = 1,53.$$

Принимаем размер магнитопровода 25×40 , $z = 1,6$, $k_m = 0,33$. При пластинах Ш25 допускают индукцию $B = 1,2 \div 1,25$ Т. Примем $B = 1,22$ Т.

Определим при $z = 1,6$ частное решение по табл. 8. Получим $P_k = 28,7d^2 = 180$ см², $P_m = 12$ Вт. Объем обмотки $V_k = 20,85d^3$, масса меди $G_m = 0,950$ кг. По выражению (19) определяем $\Delta = 2,5$ А/мм².

Определим $P_m = \frac{12 \cdot 100}{150} = 8\%$. В первичной обмотке $P_m\% = 4\%$, $\Delta U = 4\%$.

Коэффициент $K_p = 1,22 \cdot 0,33 \cdot 2,5 = 1,01$. Масса стали $G_m = 1,52$ кг, $P_c = 2,6$ Вт, $P_{\Sigma} = 12 + 2,6 = 14,6$ Вт, $\eta_T = 0,907$.

При принятой плотности тока выбираем диаметры (сечения) проводов. Для обмотки 220 В ток $I_1 = 150/220 = 0,68$ А, провод диаметром 0,59 мм (0,273 мм²); для 350 В $I = 0,25$ А, провод 0,38 мм (0,113 мм²); для 24 В $I = 0,6$ А, провод 0,55 мм (0,238 мм²); для 6,3 В $I = 5$ А, провод 1,68 мм (2,22 мм²).

Определим суммарное сечение меди из расчета один виток на вольт: $S_m = 220 \cdot 0,273 + 350 \cdot 0,113 + 24 \cdot 0,238 + 6,3 \cdot 2,22 = 119,2$ мм². Сечение меди в окне магнитопровода $S_o k_m = 15,6 \cdot 0,33 = 5,16$ см². Делением величины этого сечения на величину сечения меди, соответствующую одному витку на вольт (всех обмоток), получаем число витков на вольт, которые можно пометить в окне магнитопровода: $5,16/1,19 = 4,33$ витка.

Определим по выражению (10) требуемое по сечению стали число витков:

$$\frac{50}{BS_c} = \frac{50}{1,22 \cdot 10} = 4,1 \text{ витка.}$$

Оставляем магнитопровод Ш25 $\times$ 40.

Определим число витков обмоток. Первичная обмотка 220 В имеет 902 витка; 350 В — 1435 витков; 24 В — 92,5 витка; 6,3 В — 26 витков. Для компенсации падения напряжения число витков в первичной обмотке уменьшаем на 4%, т. е. на 36 витков, число витков вторичных обмоток увеличиваем каждое на 4%, обмотка имеет при 350 В 37 витков, при 24 В 3,5—4 витка; для обмотки

6,3 В увеличиваем число витков не менее чем на 1,5 (увеличенная длина витка).

Можно подсчитывать средние длины витков каждой обмотки по табл. 8. Для этого надо (строка 3, столбец 2) первое слагаемое в скобках $\frac{\pi}{2} \times$ заменить для первичной обмотки $\pi x (0,2 \div 0,25)$, для

вторичной $\pi x (0,7 \div 0,75)$, для обмоток накала $\pi x (0,95)$. Выбор этих коэффициентов зависит от соотношения толщин обмоток (определяется приближенно). Аналогично можно вести подсчет средней длины витка при неполном заполнении окна обмоткой.

Приведенный выше расчет целесообразно совместить с подсчетом обмоток по числу витков в слое, количеством слоев и прокладок, с учетом применяемых изоляционных материалов и технологии данного производства. При этом уточняются значения k_m и ΔU .

В приводимых примерах P_r заменялось на P_1 , что не нарушает строгости расчета. По выражению (4) $P_1 = U_1 I_1$, $P_r = E I_1$, где E — напряжение U_1 , сниженное на ΔU уменьшением числа витков (на 4%).

В полукустарном производстве обычно снижают плотность тока против предельно допустимой. Так, при аналогичном расчете (пример 4) часто принимают размер магнитопровода Ш25×50, снижают число витков. При этом упрощается расчет, технология и снижается стоимость изготовления при некотором повышении расхода стали.

В малых т. м. м. по отношению к мощности значительно повышается ток I_0 , повышается P_k (по отношению к мощности), потери в меди становятся соизмеримыми с мощностью т. м. м. При неизбежном значительном уменьшении сечения проводов снижается k_m , что приводит к еще большему высвобождению излишней поверхности охлаждения и уменьшению мощности. В таких т. м. м. настолько увеличивается взаимозависимость между параметрами, что количественные изменения одного приводят к качественным изменениям этого или других параметров, что затрудняет их расчет и в ряде случаев делает его невозможным. Встречаются рекомендации о восполнении снижения k_m повышением плотности тока с учетом поверхности P_k . Приняв рекомендуемые параметры для наименьшего размера нормали НО. 666. 000, проведем контрольный расчет.

Пример 5. Имеем т. м. м. на магнитопроводе Ш9×9. Сталь марки Э42 толщиной 0,35 мм, $B=1,0$ Т, $k_m=0,22$, $\Delta=5,3$ А/мм². По табл. 9 и расчету $G_m=0,0255$ кг, $P_m=1,4$ Вт (P_k использована полностью). Коэффициент $K_p=1,0 \cdot 0,22 \cdot 5,3=1,165$, $P_r=1,9$ Вт,

$$P_1 = 2,6 \text{ Вт}, P_2 = 1,2 \text{ Вт}, \eta_T = 0,46 \text{ (без учета потерь в стали)}, \\ P_c = 0,056 \text{ Вт}, \Delta U \% = \frac{1,4}{2,6} 100 = 54\%.$$

Нагрузочная характеристика таких т. м. м. резко спадает. Вторичное напряжение определяется сопротивлением нагрузки. Т. м. м. может рассчитываться только для работы с постоянным сопротивлением нагрузки. Расчет по ΔU практически невозможен.

При указанных выше параметрах (магнитопровод Ш9 с четырьмя стыками) ток I_0 может составить 50—60% номинального тока. Снижение плотности тока приведет к соответствующему снижению мощности. Так как м. д. с. при этом не меняется, отношение тока I_0 к $I_{\text{ном}}$ пропорционально увеличится, превышая допустимое значение I_0 . Снижение плотности тока возможно лишь при магнитопроводе, допускающем значительное повышение индукции без повышения м. д. с.

Четкой градации между средними и малыми т. м. м. не имеется. Прежде всего это определяется техническими требованиями; с повышением требований повышается порог между ними. Выбором марок стали, технологии и конструкции магнитопровода и трансформатора этот порог можно снизить. Некоторые из этих возможностей рассматриваются в последующем тексте.

Снятие характеристики намагничивания.

Для полноценного расчета т. м. м. первоочередным является снятие характеристик намагничивания магнитопровода $B=f(H)$ или $B=f(A_0)$, обязательного для всех средних т. м. м., к которым предъявляются какие-либо ограничивающие условия, и для всех малых т. м. м.

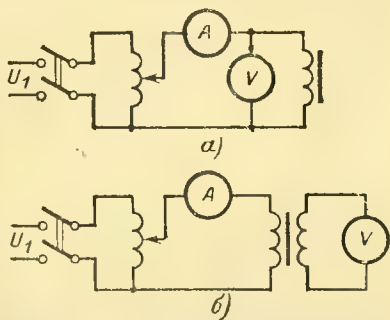


Рис. 22. Снятие характеристики намагничивания магнитопровода $B=f(H)$.

а — при одной обмотке; б — при двух обмотках.

Снимается эта характеристика на магнитопроводе, выполненном из партии стали, предназначенной для изготовления определенной серии одностипных т. м. м. (рис. 22). Питание схемы подается от регулируемого автотрансформатора (например, ЛАТР-1) для обеспечения синусоидального напряжения. Повышают напряже-

ние и замеряют ток I_0 . Согласно выражению (10) определяется значение индукции. Произведение тока намагничивания на число витков дает м. д. с. ($I_0 w$ или A_0), т. е. характеристику $B=f(A_0)$. Снятие характеристики можно производить на пакете магнитопровода любой толщины. Число витков для удобства следует округлять. При 1000 витках миллиамперметр даст показание непосредственно в амперах (м. д. с.). Для замера напряжения лучше намотать отдельную обмотку проводом любого сечения. При этом вольтметр будет замерять э. д. с. (без падения напряжения в первичной обмотке). Потребление вольтметра должно быть очень мало, особенно при испытаниях сталей с малыми потерями.

Полученная вольт-амперная характеристика является основной для выбора индукции и тока I_0 . При применении отжига характеристики снимаются после отжига. Для получения характеристики $B=f(H)$, представленной на рис. 3, следует разделить A_0 на среднюю длину магнитной линии, что соответствует значениям H при соответствующих значениях B . При наличии в магнитопроводе стыков напряженность становится условной и различной для каждого размера пластин. Расчет можно вести по напряженности (H) или м. д. с. (A_0).

При изготовлении единичных т. м. м. характеристики снимаются непосредственно на данном магнитопроводе.

Снятие характеристик осложняется на разрезных магнитопроводах серии КД-ТД (приложение П-3), поскольку при сборке торцы подковок склеиваются специальным составом на основе карбонильного железа, что повышает магнитную проницаемость магнитопровода. При требованиях к т. м. м., ограничивающих значение тока I_0 , необходимо на опытных образцах снять характеристики $B=f(H)$ до склейки и после нее для оценки качества технологии склейки и повышения магнитной проницаемости.

Определение отношения $I_0/I_{\text{ном}}$ трансформатора. Значение тока I_0 само по себе мало показательным. Принято I_0 относить к номинальному току $I_{\text{ном}}$ обычно в процентах. Но значения тока $I_{\text{ном}}$ при одном и том же магнитопроводе могут быть различными. Оценку магнитопровода следует вести при одинаковых условиях, как это выполнено в табл. 9 в условных единицах. При принятом допущении $(k_m \Delta) = 1 \text{ А/мм}^2$ половина площади окна, выраженной в квадратных миллиметрах, соответст-

ует $I_{\text{ном}}\omega$ (или $A_{\text{ном}}$). Дадим отношение длины магнитной линии к площади полуокна. При умножении этого выражения на напряженность (H , А/см), соответствующую какому-либо значению индукции B , получаем отношение м. д. с. (A_0) к значению $A_{\text{ном}}$ или $I_0/I_{\text{ном}}$ для данного значения B . При замере площади полуокна, выраженной в квадратных сантиметрах, получаем это отношение непосредственно в процентах ($I_0/I_{\text{ном}}$). Вышесказанное выразим в геометрии в расчетном выражении (табл. 8):

$$l_c/0,5S_0 = \frac{2(x+y+\pi/4)}{0,5xy} = d^{-1}.$$

Аналогично рассчитываются множители и для единичных т. м. м. по столбцу 5 табл. 8. Для нормали НИО. 010. 005 определяется множитель для каждого размера K_0 .

Для принятой нормали (НО. 666. 000) этот множитель равен $6,85 \times d^{-1}$, т. е. для т. м. м. на пластинах Ш10 множитель равен 6,85; Ш12— $6,85/1,2=5,7$; Ш16— $6,85/1,6=4,28$; Ш20— $6,85/2,0=3,425$; Ш40—1,71. Для

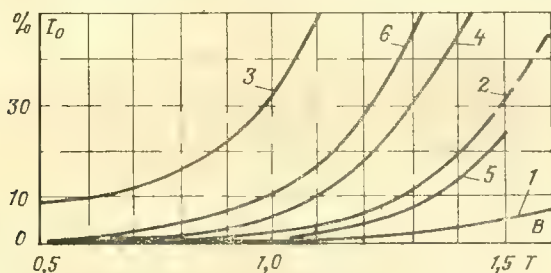


Рис. 23. Зависимость тока I_0 , %, от индукции B при различной длине l_c .

1 — магнитопровод $l_c=35$ см, сталь марки Э42, без стыков; 2 — то же при четырех стыках; 3 — то же, $l_c=9$ см; 4 — тип Ш12, сталь марки Э330А, при четырех стыках; 5 — тип Шу16, сталь марки Э42; 6 — тип Ш10, сталь Э330А при четырех стыках.

магнитопроводов, имеющих стыки, напряженность определяется по кривой намагничивания данного размера магнитопровода (при любой толщине) при отсутствии участков повышенного сопротивления по единой для всех размеров характеристике магнитопровода по тем же коэффициентам, что и выше.

По рис. 3 подберем характеристики магнитопроводов с длиной магнитной линии l_c , близкой к длине l_c магнитопроводов Ш10, Ш20, Ш40. Для Ш10 примем кривую 4, для Ш20 — кривую 5 и для Ш40 — нижнюю пунктирную кривую 2. Для Ш10 при $B=0,8; 1,0; 1,1$ Т $H=2,4; 3,0; 8,0$ А/см. При умножении на 6,85 получим отношение тока I_0 к I_y (условной мощности) 16, 34, 55%; для Ш20 при те же индукциях напряженность $H=1,4; 3,0; 4,5$ А/см; если умножить напряженность на 3,425, то получим отношение токов 4,8; 10,2; 15,3% и для Ш40 при $B=1,0; 1,2; 1,3$ Т получим отношение токов 3,3; 9,0; 15%.

На рис. 23 приведены кривые: 2 — для Ш40, 3 — для Ш10, 1 — аналогичная Ш40, но без участков повышенного сопротивления (рассчитана по кривой 1 на рис. 3).

Приведенные характеристики являются условными, поскольку за $I_{ном}$ принята площадь полуокна, выраженная в квадратных миллиметрах, т. е. $K'_p = k_m \Delta = 1$. Корректировка полученных значений выполняется делением их на фактическое значение этого коэффициента. При этом действительные значения $I_0/I_{ном}\%$ обычно повышаются, так как $K'_p < 1$ (не учитывая некоторые исключения).

Выше приведен метод расчета токов $I_0\%$. Характеристики, приведенные на рис. 23, весьма приближенны, поскольку базируются на усредненных характеристиках стали. Они показывают лишь характер соотношения токов I_0 при изменениях размеров пластин.

Пример 6. Дается сравнение силовых т. м. м., изготавливаемых разными заводами, сравнительный пересчет и выводы. Для сравнения взяты три т. м. м. (применяемые в телевизорах), близкие друг к другу, но отличающиеся по мощности. Магнитопровод у всех выполнен по нормали УШ30×63, сталь марки Э310 толщиной 0,35 мм. Обмоточные данные первичной обмотки одинаковы, с переключением 127/220 В, провод марки ПЭЗ-1 диаметром 0,59 мм, первичная обмотка имеет 220×2 и 32×2 витка. В первом трансформаторе имеется экранная обмотка из 80 витков. Мощность первого 180, второго — 170 и третьего — 150 Вт. Соответственно токи при 220 В: 0,818; 0,773; 0,682 А, плотность тока: 2,95; 2,8; 2,5 А/мм². При одинаковых S_c (18,9 см²) и одинаковом числе витков ($2w/B$) индукция всех т. м. м. одинакова и по выражению (10) равна 1,35 Т. Коэффициенты k_m соответственно равны: 0,265; 0,25; 0,25. Но эти коэффициенты технологические, учитывают все сечение меди, включая и холостые витки (дополнительные на 127 В и экранные обмотки), которые участвуют в теплостойкости и теплопроводности, улучшают тепловой режим обмотки. При расчетах их следует исключать. При этом для всех т. м. м. $k_m \approx 0,23$.

Рассчитаем допустимую плотность тока и сравним с заводскими параметрами.

Определим P_K (см. табл. 8):

$$P_K = 2h(\pi b + d + a) = 2 \cdot 5,3(3,14 \cdot 1,9 + 6,3) = 161,2 \text{ см}^2.$$

Допустимые потери $P_M = 161,2/15 = 10,74$ Вт.

Потери определяют по активной меди, т. е. при $k_M = 0,23$.

Определим массу

$$G_M = 2bh \left(\frac{\pi}{2} b + d + a \right) k_M \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = \\ = 2 \cdot 1,9 \cdot 5,3 \left(\frac{\pi}{2} 1,9 + 3,0 + 6,3 \right) 0,23 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,510 \text{ кг.}$$

По допустимым потерям и массе определяем:

$$\Delta = \sqrt{\frac{10,74}{2 \cdot 0,510}} = 3,25 \text{ А/мм}^2.$$

При расчете по полному объему меди $\Delta = 3,06$ А/мм². При этом объем увеличен примерно на 15%, Δ снижена на 7%.

Определим потери в меди для всех трех т. м. м. При $\Delta = 3,25$ А/мм² $P_M = 10,74$ Вт. Для первого т. м. м. плотность тока снижается в 1,1 раза ($3,25/2,95 = 1,1$), потери снижаются в квадрате, $P_M = 10,74/1,21 = 8,9$ Вт, для второго т. м. м. $P_M = 8$ Вт, для третьего — 6 Вт, в первичных обмотках потери составят: 4,5; 4; 3 Вт.

Потери в меди первичных обмотках и ΔU по отношению к мощности т. м. м. составляют для первого трансформатора $\frac{4,5 \cdot 100}{180} =$

$= 2,5\%$, для второго — 2,3%, для третьего — 2%. Потери значительно меньше, чем при нормали НО.666.000.

Помимо потерь в меди весьма существенна величина тока I_0 . С уширением ярма м. д. с. снижается и характеристика $B = f(H)$ при $B = 1,2 \div 1,3$ Т на 12—13% выше при одинаковой м. д. с. по сравнению с т. м. м. без уширения ярма. Учитывая это, рекомендуют для этой нормали применять стали марок Э42 и даже Э41 при индукции $B = 1,35$ Т (для средних т. м. м.). Однако само снижение м. д. с. не показательно, поскольку она замеряется в амперах (без учета витков). Сравним УШ30 и Ш25. Пластина УШ30 имеет уменьшенный размер окна: 10,1 см² против 15,5 см² для Ш25, при уменьшенном окне снижается k_M . В результате число витков обмотки УШ30 снижается против числа витков Ш25 на 45%. При неизменной м. д. с. в том же отношении увеличится ток I_0 .

Значение отношения l_c к S_c характеризует до некоторой степени возможность применения того или иного магнитопровода в зависимости от технических требований.

При нормали НО.666.000 этот множитель равен: для пластины Ш10 — 6,85, для Ш25 — 2,74, при нормали НИО.010.005: для пластины УШ10 — 11,1, УШ30 — 3,8; кроме того, множитель увеличивается за счет сниженного значения k_M . Скорректируем расчетный множитель для трех т. м. м. по $K'_p = k_M \Delta$. Получаем, что для первого т. м. м.

множитель равен $\frac{3,8}{0,23 \cdot 2,95} = 5,6$, для второго — 5,9, для третьего — 6,5.

Поскольку параметры первичных обмоток известны, можно определить действительные множители по первичным обмоткам ($A_1 = I_1 w$). Для первого т. м. м. $A_1 = 440 \cdot 0,818 = 360$ А, для второго — 340 А, для третьего — 300 А.

При определении множителя делим длину магнитной линии на условное сечение меди в полуокне. Длина магнитной длины $l_c = 19,1$ см. В полуокне магнитопровода имеется обмотка, сечение меди которой определяется размером полуокна и коэффициентом k_m .

В числитель вводим 100 для перевода сечения меди в квадратные сантиметры. Получаем множитель для первого т. м. м. $\frac{19,1 \cdot 100}{360} =$

$= 5,31$, для второго — 5,62, для третьего — 6,37. Множители имеют значения ниже усредненных, что определяется несколько сниженным S_m всех вторичных обмоток против S_m первичных обмоток.

Выше рассмотрены силовые т. м. м. телевизоров «Верховина» мощностью 180 Вт, «Концертный» 170 Вт и «Рубин-102» первого выпуска 150 Вт. Показательно, что на следующих выпусках «Рубин-102» 150 Вт принят магнитопровод с пластинами УШ31×66 при тех же витках на вольт, т. е. индукция снижена на 10% ($B = 1,25$ Т); сталь марки Э310 толщиной 0,35 мм.

Метод расчета по табл. 8 предназначен для предварительного расчета в общем виде по напряженности стали. В данном примере он приведен для сравнительной оценки расчета по усредненным и фактическим параметрам. Полученная разница незначительна и вполне допустима при усредненном расчете.

На изготовленном т. м. м. применять этот метод определения тока I_0 , %, нецелесообразно. Как правило, замеряют ток I_0 (при $U_{ном}$ или с учетом ΔU) и получают фактическое значение тока I_0 , % (без промежуточных расчетов).

В последующем тексте рассматриваются некоторые возможности повышения магнитной проницаемости стали, т. е. снижения м. д. с.

Влияние отжига стали. Одним из способов значительного снижения тока намагничивания является отжиг стали. На рис. 24 приведены характеристики двух магнитопроводов — с отжигом и без отжига. Отжиг производился по третьему способу с ограниченным доступом воздуха. На магнитопроводе на пластинах Ш12 при $B = 0,7 \div 0,8$ Т отжиг повышает проницаемость стали в 2,6—2,7 раза несмотря на наличие четырех стыков. Далее это соотношение снижается, что определяется насыщением стыков. На магнитопроводе типа ШУ16 наибольший эффект отжига достигается при $B = 1,15 \div 1,2$ Т, магнитная проницаемость повышается в 2,4 раза.

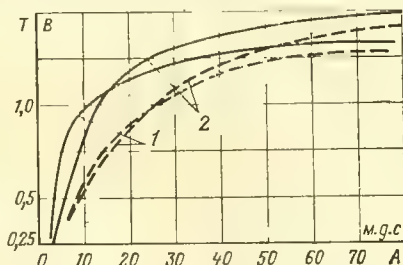
Выше расчет тока I_0 произведен по напряженности магнитопровода H (А/см). При снятии характеристики $B = f(A_0)$ расчет можно вести по A_0 (м. д. с.). Делим значение A_0 для какого-либо значения индукции B на площадь полуокна пластины и получаем $I_0/I_{ном}$ %. На-

пример, при $B=1,25$ Т для пластины Ш12 значение $A_0=36$ А, площадь полуокна $1,8$ см², $I_0=36/1,8=20\%$; для Шу16 $A_0=24$, площадь полуокна $3,2$ см², $I_0=24/3,2=7,5\%$. Так же определяются значения I_0 , %, для других значений индукций. Рассчитанные характеристики приведены на рис. 23, кривые 4 и 5.

Показательно сравнение кривых 3 и 6. Кривая 3 соответствует магнитопроводу на стали марки Э42 без отжига, рассчитана по усредненным характеристикам (при $l_c=9$ см), кривая 6—магнитопроводу на стали

Рис. 24. Характеристики магнитопровода.

1 — тип Ш12, сталь марки Э330А, толщина 0,35 мм; 2 — тип Шу16, сталь Э42, толщина 0,35 мм; — с отжигом; - - - без отжига.



Э330А с отжигом, рассчитана по характеристике, снятой на магнитопроводе Ш10×20. Оба магнитопровода имеют по четыре стыка, но при стали марки Э42 ток I_0 при $B=1,0$ Т почти вдвое превышает ток I_0 при стали марки Э330А с отжигом.

Отжиг повышает стоимость изделий в основном за счет производственных затрат, помимо того требует дополнительного помещения и оборудования. Поэтому при изготовлении больших и средних т. м. м. бытового назначения отжиг обычно не применяется. Иногда взамен отжига применяют стали повышенного качества.

В специальных т. м. м. в зависимости от технических условий отжиг необходимо совмещать с одновременным применением лучших марок сталей. То же обязательно для малых т. м. м. независимо от их назначения.

Полноценным решением является применение магнитопроводов без участков повышенного сопротивления. Изготовление кольцевых витых т. м. м. возможно на хорошо оснащенном производстве. К тому же для средних и больших т. м. м. кольцевая форма не всегда технологична. Наиболее перспективны т. м. м. с магнитопроводами на пластинах типа Шу и Пу. При стали марки Э42 для малых т. м. м. допустима индукция $B=1,35 \div 1,45$ Т при относительно небольшом токе I_0 , для сред-

них и больших т. м. м.—1,45—1,55 Т. Для холоднокатанных сталей лучшими являются магнитопроводы типов ШЛ и ПЛ (по рис. 7) без разреза. Но их изготовление очень трудоемко, и они могут выполняться единичными или мелкосерийными на кустарном производстве. При применении холоднокатанных сталей на магнитопроводах типов Шу и Пу магнитная проницаемость снизится за счет участков магнитной линии, идущих поперек проката, но они будут стабильнее, чем ленточные магнитопроводы с разрезом. Следует применять стали марок Э330 и Э330А.

Следует учитывать, что на пластинах типов Шу и Пу с уменьшением базового размера поверхность перехода снижается в квадрате (12), при этом снижается число пластин, что приводит к снижению поверхности перехода в третьей степени, а по отношению к S_c и магнитному потоку снижается пропорционально базовому размеру. В зависимости от качества поверхности пластин и толщины лакового покрытия может незначительно повыситься сопротивление (в пределах допусков стали). Поэтому для наименьших размеров пластин может быть целесообразнее взамен т. м. м. БТ применять СТ1, имеющие площадь перехода в 2 раза большую. При этом упрощается штамп и значительно снижается его стоимость.

В настоящее время в устройствах автоматики широко применяются для малых т. м. м. магнитопроводы на пластинах типа Пу, выполняемые для повышенных частот из магнитно-мягких сплавов различных марок.

Расчет по усредненным характеристикам больших и средних т. м. м., к которым не предъявляются ограничивающие условия нормального исполнения, производится достаточно просто. Определяются размеры пластин и ориентировочная толщина магнитопровода (см. примеры 1 и 3) по заданной первичной мощности. При заданной вторичной мощности оценивается к. п. д. (η). Для больших т. м. м. коэффициент k_m мало зависит от толщины магнитопровода (при примерно одинаковом назначении), для средних—изменяется незначительно и легко корректируется. Затем определяется допустимая плотность тока (пример 2). Ориентировочные усредненные значения индукции приведены в § 2. По примеру 4 выбираются сечения и диаметры проводов и рассчитываются числа витков. При этом корректируется толщина

магнитопровода. Обычно принимается ближайший больший размер (по нормали). По плотности тока и массе меди определяются потери в меди и ΔU . Можно определить ΔU по числу витков и сопротивлению обмоток. Остальные параметры обычно не определяют. Эти расчеты могут выполняться квалифицированным электромонтером или мастером.

Более сложен расчет т. м. м., к которым предъявляются те или иные ограничения. Для испытательных устройств, предназначенных для разъездных работ, требуются ограничения по массе и объему. Эти требования до некоторой степени однозначны: с повышением индукции и плотности тока снижаются обычно объем и масса т. м. м. Значительно сложнее одновременно выполнить снижение I_0 и ΔU , эти требования в определенной степени противоположны. Встречаются и другие, более сложные требования, относящиеся к специальным т. м. м., которые, как и малые т. м. м., требуют предварительного расчета, изготовления макетов (опытных образцов), последующих испытаний, корректировки и окончательной доводки параметров, выполняются в каждом случае с учетом технических условий. То же относится и к т. м. м. на повышенные частоты. В большинстве случаев они требуют инженерного расчета, так как эти расчеты помимо выбора параметров часто сопряжены с выбором технологии, материалов и иногда разработкой конструкции магнитопроводов.

Стоимость т. м. м. В некоторых руководствах встречаются рекомендации по снижению стоимости т. м. м. за счет применения сталей пониженного качества. Это не обосновано. Наиболее целесообразно для т. м. м. применять марки сталей повышенного качества: горячекатаные стали марок Э43, Э43А толщиной 0,35 мм и холоднокатаные марок Э330, Э330А толщиной 0,35 мм. Для малых т. м. м. в ряде случаев только их применение может дать возможность выполнения элементарных технических условий (пример 5). Эти марки имеют пониженную м. д. с., допускают повышать индукцию и, следовательно, уменьшают число витков обмоток, снижая массу меди.

Помимо этих соображений, надо учитывать стоимость изготовления т. м. м.; в средних т. м. м. расход меди доходит до 1—1,2 кг и стали до 2—3 кг, стоимость меди и стали в какой-то степени соизмерима со стоимостью

изготовления, стоимость изготовления малых т. м. м. значительно превышает стоимость материала.

Примерная оптовая стоимость стали марок Э11, Э12 толщиной 0,5 мм—0,22 руб/кг; Э41, Э42 толщиной 0,35 мм—0,32 руб/кг; Э44 толщиной 0,2 мм—0,52 руб/кг; Э310—Э330 толщиной 0,35 мм—0,70 руб/кг. Пармаллой 50Н толщиной 0,35 мм—4,46 руб/кг; 79НМ толщиной 0,2 мм—7,32 руб/кг.

Из магнитных материалов наиболее высока стоимость пермалловых сталей, но этот материал применяется для специальной аппаратуры.

В приложении П-3 приведена стоимость магнитопроводов разных размеров. Так, например, магнитопровод типа КД-ТД-1 имеет массу 2,62 кг (с крепежными деталями), а типа КД-ТД-10 имеет массу 0,03 кг. Масса второго в 85 раз меньше, а стоимость в 2,2 раза меньше.

Как показано выше в примерах 4 и 6, в бытовых т. м. м. часто увеличивают толщину магнитопровода против расчетной. При этом упрощается технология изготовления, снижается стоимость изготовления и с меньшими затратами обеспечивается гарантийный срок изделия при некотором увеличении расхода стали и меди.

С уменьшением размеров пластин для малых т. м. м. несоразмерно увеличивается относительная стоимость инструмента (матрицы и пуансона), в особенности для пластин типа Ш. Значительно ниже стоимость инструмента для пластин типа П, наименьшая стоимость—для пластин типа Г. Поэтому в бытовых изделиях (например, в автотрансформаторах 220/127 В) применяют трансформаторы СТ, а чаще СТ1. Применяют их часто в радиолах (например, «Байкал», «Луч» и др.), в которых объем футляра допускает располагать силовые т. м. м. за пределами шасси. Применив при этом стали повышенного качества (марок Э43 и Э43А), можно повысить индукцию на малых т. м. м. на 10—12% и соответственно снизить число витков, т. е. уменьшить массу меди и снизить стоимость.

В настоящее время для мощных силовых трансформаторов, где расход стали составляет тонны, переход на применение холоднокатаных сталей приводит к экономии в эксплуатации [Л. 12].

7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Классификация специальных т. м. м. очень велика, назначение и требования к ним различны. Большую группу в энергетике составляют различные трансформаторы и автотрансформаторы напряжения и тока, включаемые между линейными трансформаторами напряжения или тока и устройствами релейной защиты, автоматики, телеизмерений. Часто в мастерских энергосистем изготавливаются нагрузочные трансформаторы для испытания аппаратуры большими токами. Изготавливаются трансформаторы для питания расчетных моделей и других устройств. Их мощность может достигать 4—5 кВ·А и более. По существу они не являются трансформаторами малой мощности, поскольку их расчет ближе к расчету мощных силовых трансформаторов. Аналогичные большие т. м. м. изготавливаются на кустарном производстве единичными или малыми сериями.

С введением нормалей группу т. м. м. следует ограничить по мощности верхним пределом магнитопровода на пластинках Ш40 и др. При изготовлении трансформаторов большей мощности они именуются условно «большими т. м. м.» до перевода их в серийное заводское производство, где им присваивается название по их назначению.

Для многих т. м. м.—измерительных (для снятия только потенциала), импульсных, пилообразного напряжения и др.—параметры η_t , ΔU , P_2 теряют свое назначение. Можно определять лишь габарит по условной мощности P_y . Для специальных т. м. м. на частоту 50 Гц и выше рекомендуется переходить на пластины типа Шу и Пу. Эти пластины в настоящее время применяются в группе микротрансформаторов с базовым размером от 0,6 до 0,2 см, которые с развитием электроники получили широкое внедрение. По назначению, расчетам и технологии они выходят за пределы т. м. м. и здесь не рассматриваются.

Автотрансформатором именуется трансформатор, в котором функции первичной и вторичной обмоток выполняет одна обмотка с отпайками. Он может быть понижающим или повышающим. В первом вся обмотка включена на напряжение сети, с части обмотки снимается напряжение. Во втором напряжение сети подается на часть витков, нагрузка снимается со всех

витков. На рис. 25, а дана схема повышающего автотрансформатора, часть мощности—габаритная P_r (трансформируемая) передается в нагрузку электромагнитным путем, остальная (переходящая) передается электрически непосредственно из сети. Для пояснения его работы на рис. 25, б дана его развернутая схема, он показан как вольтодобавочный трансформатор. Его трансформируемая мощность определяется током I_2 и добавочным напряжением

$$P_r = UI_2.$$

Аналогично работает и понижающий автотрансформатор.

Основные преимущества автотрансформатора — сниженные размеры, масса, потери в меди, высокий к. п. д., хорошая нагрузочная характеристика. Недостатком в некоторых случаях является электрическая связь первичной и вторичной цепи. Широко применяются авто-

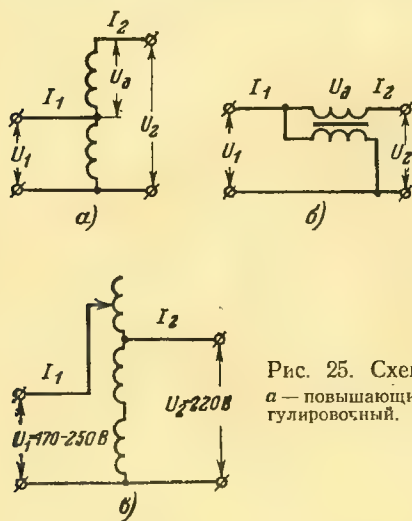


Рис. 25. Схемы автотрансформаторов.
а — повышающий; б — вольтодобавочный; в — регулировочный.

трансформаторы на 220/127 В и 127/220 В. Рассчитываются они по габаритной мощности, как обычные силовые т. м. м.

Регулировочный автотрансформатор (рис. 25, в) предназначен для компенсации колебания напряжения сети. Мощность P_r переменная, расчет ведется по максимальной мощности, размер S_0 увеличен. Регулировка показана на первичной стороне, что обеспечивает неиз-

менный режим магнитопровода, но чаще (в бытовых всегда) регулировку выполняют на вторичной стороне во избежание ошибочного включения.

В лабораториях иногда применяют автотрансформатор, выполненный на удлиненном магнитопроводе (с большой длиной окна), на верхнем слое обмотки которого прочищена дорожка, по которой скользит контакт.

При лабораторных испытаниях применяют автотрансформаторы с регулировкой напряжения от 0 до 240—250 В. Широко применяют для этих целей заводские автотрансформаторы ЛАТР-1 (на ток до 9 А) и ЛАТР-2 (на ток до 2 А).

Марки сталей применяют те же, что и для силовых т. м. м. Провод в пределах регулировки принимают одного диаметра, техническими условиями обычно не ограничиваются.

Трансформаторы напряжения и тока. В современной автоматике, охватывающей все области техники, широко применяются т. м. м., работающие при широком изменении индукции, при этом требуется сталь с повышенной магнитной проницаемостью в средних и малых магнитных полях. Этим требованиям удовлетворяют стали марок Э47, Э48, Э370, Э380. ГОСТ регламентирует параметры сталей марок Э47, Э48 от 0,1 до 10 А/см, марок Э370, Э380—от 0,03 до 10 А/см (рис. 26). Для т. м. м. в основном применяются листы стали толщиной 0,35 мм.

Магнитопровод следует применять ленточный типа ШЛ или ПЛ (рис. 7) без разрезов или типа Шу и Пу. Эти конструкции значительно расширяют возможности расчета т. м. м. При расчете по выражениям (14) и (16) можно, не повышая индукции при условной мощности P_y , получить малые значения тока I_0 или, повысив индукцию, значительно снизить плотность тока и ΔU . При требованиях уменьшения габаритов и массы можно повысить индукцию и плотность тока (в пределах допустимого) и перейти на меньший размер пластин. Приведенные на рис. 7 магнитопроводы ШЛ и ПЛ (без разреза) негигиеничны и для заводского производства неприемлемы. В настоящее время магнитопроводы на пластинах Шу и Пу нашли широкое применение для аналогичных промежуточных т. м. м., а также для специальных т. м. м. и изготавливаются Чебоксарским электроаппаратным заводом для устройств релейных защит,

В энергосистемах изготавливается много так называемых промежуточных трансформаторов напряжения и тока, включаемых между линейными трансформаторами напряжения (тока) и соответствующими устройствами релейной защиты. К этим устройствам предъявляются требования безотказности. Промежуточные т. м. м. должны в точности передавать на защитное устройство любое нарушение нормального режима работы сети. Часто

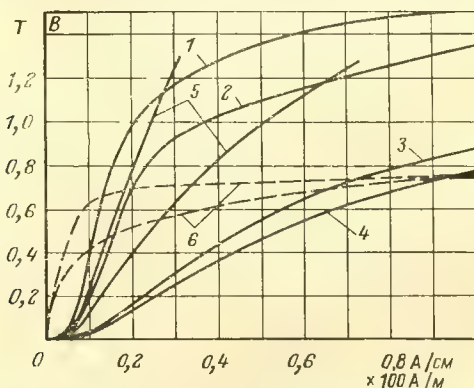


Рис. 26. Характеристики сталей с повышенной проницаемостью в средних магнитных полях (параметры по ГОСТ).

1 — сталь марки Э330; 2 — Э370; 3 — Э48; 4 — Э47; 5 — заводские характеристики, сталь марки Э310; 6 — мопермаллой при штампованных пластинках, верхняя кривая — пластины ШУ20, нижняя — Ш20.

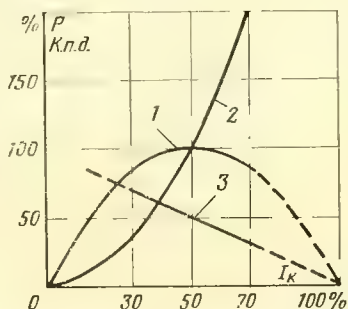
они выполняются как автотрансформаторы, обычно с большим количеством отпаяк для регулировки чувствительности устройства. Достаточно обрыва провода в т. м. м. или в одном из элементов устройства защиты и может быть отказ или ложная работа защитного устройства. В промежуточном т. м. м. тока обрыв провода исключен, но, как покажем ниже, может быть нарушение контакта.

Нагрузочные трансформаторы. В энергосистемах приходится изготавливать большие т. м. м. для испытаний станционной аппаратуры (трансформаторы тока, контакты масляных выключателей и др.) токами, достигающими до 2—3 тыс. А. Основное требование к ним — отбор максимально возможной мощности кратко- временно при предельной мощности, определяемой се-

кундами (время успокоения стрелки измерительного прибора). На рис. 27 приведена величина вторичной мощности в зависимости от тока, определяемого сопротивлением нагрузки (для упрощения на рисунке ток намагничивания не показан). Имеются два значения, соответствующие нулевой отдаваемой мощности: когда ток $I_2=0$ ($I_0=I_{x.x}$) и когда вторичная обмотка закорото-

Рис. 27. Характеристики нагру-
зочного трансформатора при но-
минальном напряжении и при из-
менениях $z_{нагр}$.

1 — снимаемая (вторичная) мощность;
2 — мощность, теряемая в трансформа-
торе; 3 — к. п. д. трансформатора.
Максимальный ток вторичный, принят
за 100%.



чена — $I_2=I_{\max}$, $U_2=0$, вся мощность теряется в т. м. м., $E=0,5U_1$. Максимальная мощность отбора соответствует равенству $z_t=z_{нагр}$, при этом напряжение $U_2=0,5U_1$. Мощность близка к максимальной в довольно широком диапазоне — от 30 до 70% тока короткого замыкания, принятого за 100%. Потери мощности в т. м. м. при токе к. з. 70% в 5 с лишним раз больше потерь при токе 30% при той же отбираемой мощности. Более выгодным является соотношение $z_{нагр}' \geq z_t$. Так как $z_{нагр}$ может быть различным, то для изменения z_t вторичную обмотку выполняют часто из четырех секций, собираемых в различных комбинациях. Иногда делают восемь секций, но это усложняет схему переключателя. Первичную обмотку выполняют из двух или четырех секций.

Обращаем внимание, что режим нагрузочного т. м. м. имеет общее с режимом малого т. м. м. (см. пример 5): $z_t \approx z_{нагр}$, $\eta_t \approx 0,5$. Но в малом т. м. м. этот режим вынужденный, и хотя т. м. м. термически устойчив, значительно ограничиваются возможности его расчета и применения. В нагрузочном — этот режим создан искусственно за счет значительного повышения термической устойчивости с учетом кратковременной нагрузки и расширяет возможности его применения.

Обмотку для таких т. м. м. рекомендуется выполнять галетную проводом ПСД или ПСДК, лучше прямоуголь-

ного сечения, стяжку и оплетку галет—лентой из стекловолокна. Галеты надо пропитывать кремнийорганическими лаками. Рабочая температура допустима 180°C, кратковременно (2—3 ч) до 250°C. Гильзу следует изготавливать из стеклотекстолита или шиферасбеста с применением трубы соответствующего диаметра. Магнитопровод следует выполнять стержневой из ленточной стали

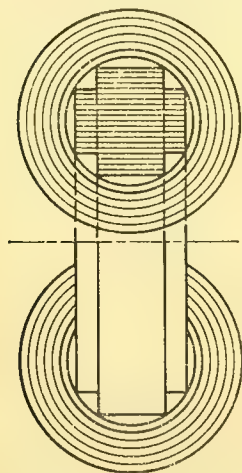


Рис. 28. Магнитопровод и обмотки нагрузочного трансформатора.

(рис. 28). Такие размеры обычно выполняются двухступенчатыми. Ширина основной ленты 0,850*d*, толщина набора 0,525*d*, ширина второй ленты 0,525*d*, толщина второй 0,850*d*. Коэффициент заполнения площади круга 0,785. Такой т. м. м. должен быть достаточно транспортабелен и рассчитан на переноску на малые расстояния (к автомашине, в пределах помещения электростанции) не более двумя работниками, на установках высокого напряжения запрещается работать одному работнику.

При больших токах нельзя пренебрегать сопротивлением соединительных проводов. Кроме того, мощность сети не бесконечно велика. Так как в конечном результате требуется не максимальный отбор мощности от сети, а получение максимальной мощности на нагрузке, приведенное выше выражение примет вид:

$$Z_{\text{сети}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{пров}} \leq Z_{\text{нагр.}}$$

К нагрузочным трансформаторам относятся и сварочные трансформаторы. По способу включения нагрузки они делятся на две основные группы. Трансформатор первой группы включается со вторичной нагрузкой на время включения нагрузки. К этой группе относится и рассмотренный выше нагрузочный трансформатор. В трансформаторах второй группы первичная обмотка включена непрерывно, нагрузка подключается периодически.

Аналогично работает и аппарат для точечной сварки листовой стали. Автомат сводит электроды и одновременно подает напряжение на сварочный трансформатор.

Длительность включения порядка 1 с, интервал 30—60 с. В таких случаях может быть допущена кратность тока не более 50—70 длительно допустимой, большие тепловые и динамические удары могут повредить обмотку.

В сварочном аппарате для дуговой сварки величина тока I_0 должна быть ограничена, так как первичная обмотка включена длительно и при отсутствии нагрузки ток $I_0 = I_{х.х}$ замедляет охлаждение обмотки и дополнительно нагревает сталь.

Представляет интерес выполнение специального большого т. м. м. на Пу-образных пластинах в устройствах питания оперативных цепей защиты на подстанциях энергосистем.

Для сопоставления были изготовлены (Горэнерго, инж. А. А. Воскресенским) два трансформатора, которые при равной мощности 1,2 кВ·А, одинаковых размерах окна имели: первый—магнитопровод из обычных пластин стали Э42 сечением 24 см² при массе 6,7 кг, второй—магнитопровод из пластин с уширенным основанием сечением 15,5 см² при массе 4,5 кг. При этом второй трансформатор имел меньший ток намагничивания.

Трансформаторы на повышенные частоты. При расчете по выражению (7) при изменении частоты и неизменных параметрах правой части равенства произведение $S_0 S_c$ должно уменьшиться пропорционально увеличению частоты. В действительности при частоте 400 Гц масса и объем средних т. м. м. снижаются в 4,5—5,5 раза, больших—в 3—4 раза. Подгруппа малых т. м. м. смещается за пределы нормалей. С повышением частоты значительно повышаются потери в стали (см. табл. 3), ограничивая индукцию. Так как геометрия т. м. м. (см. табл. 8) остается неизменной, то при выборе соотношения S_0 и S_c следует уменьшать S_c с учетом характеристики $B=f(H)$ и формулы (20) — множителя, определяющего I_0 , %, во избежание значительного увеличения тока I_0 . Таблица 9 составлена только для частоты 50 Гц. Для частоты 400 Гц можно составить подобную таблицу, если ввести соответствующие коэффициенты.

При повышенных частотах значительно повышаются потери в питающей сети. Область применения повышенных частот определяется малой протяженностью сети и большой насыщенностью техникой. При повышенных

частотах применение магнитопроводов с участками повышенного сопротивления недопустимо, так как мощность источника повышенной частоты ограничена.

Дополнительные требования повышения надежности. В настоящее время вопросы надежности и учет климатических и других, иногда очень тяжелых, условий крайне актуальны. Наряду с разработкой различных устройств, схемных решений все большее значение приобретают технология производства и «малые» вопросы надежности, с которыми приходится сталкиваться при изготовлении аппаратуры.

Устройства релейной защиты энергосистем должны реагировать на все изменения нормальной работы, т. е. при авариях. Некоторые устройства могут не работать годами, но на аварию они должны реагировать четко и отключать только аварийный участок. Отказ или ложная работа может привести к развитию аварии и последующему обесточению значительного района. Основным требованием для этих устройств является безотказность.

Выше упоминалось о разрушающем действии токов утечки на изоляцию. Наличие химических реагентов, сырой и жаркий климат значительно ускоряют разрушение изоляции и приводят к коррозии меди (провода). В тропиках добавляются специфичные реагенты, вызывающие коррозию меди и разрушающие изоляцию даже при складском хранении.

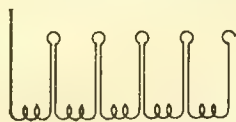
Следует избегать схем, в которых обесточенная обмотка находится под потенциалом по отношению к земле (магнитопроводу). В электронных устройствах надежность выходных трансформаторов и дросселей, включенных в плюсовой провод, значительно повышается при изоляции магнитопровода от земли (шасси) и соединении с плюсом (если на них нет заземленных обмоток). При наличии потенциала между обмоткой и магнитной системой разрушающее действие токов утечки пропорционально квадрату потенциала.

В энергосистемах часто изготавливаются промежуточные трансформаторы (или автотрансформаторы) тока, включаемые между линейными трансформаторами тока (по вторичным цепям) и устройствами релейной защиты или автоматики с большим количеством отпаяк для выравнивания трансформации разных сторон или регулировки установок защиты.

Напряжения при нормальном режиме на этих обмотках очень малы. Практически токи утечки отсутствуют. Возможность коррозии провода и обрыва отсутствует, так как применяются провода достаточно большого диаметра (до 1,81 мм). Однако нарушения цепи возможны.

При намотке от каждой секции делается два вывода, монтажник обрезает концы, сворачивает их в кольца и затягивает винтами на переключателе. При установке защитной аппаратуры в неотапливаемом помещении за счет колебаний окружающей температуры контакт в винтовом соединении ослабевает и при большом токе корот-

Рис. 29. Выполнение отпаяк в токовой обмотке.



кого замыкания (при аварии) нарушается. Это неоднократно имело место в токовых цепях с трансформаторными и автотрансформаторными обмотками при большом числе отпаяк. Возможность нарушения контакта вызывала необходимость проверки всех отпаяк. В устройствах, по отношению к которым основным требованием является безотказность, следует во всех цепях, особенно токовых, избегать излишних винтовых соединений, каждое из которых является элементом, снижающим надежность; имеющиеся соединения следует выполнять доступными для контроля. При непрерывной обмотке, показанной на рис. 29 [Л. 5], проверка затяжки требуется только на рабочей отпайке, что значительно упрощает контроль и повышает надежность.

В изготовленном трансформаторе можно проверить ряд электрических и магнитных параметров, но соответствует ли технология требуемому уровню надежности, проверить не всегда возможно. Это может контролироваться лишь в процессе изготовления мастером или квалифицированным электромонтером, для чего они должны иметь четкие технические требования и хорошо понимать их назначение.

Независимо от требований надежности во всех устройствах следует предусматривать возможность съема любой детали при минимальном снятии других элементов. Это повышает ремонтнопригодность устройства.

Приложения

П-1 Нормаль ПО.666.000 выполнена (ГОСТ 8032-56) по ряду прогрессии со знаменателем 1,25 (приближенно)

Типоразмер	Размеры, мм				Справочные величины			
	d	h	b	a	S ₀ S _c	Средние длины, см		Коэффициент заполнения k_M
						l_M	l_c	
Ш9×9	9	22,5	9	9	1,64	6,43	7,71	0,22/0,17
Ш9×12	9	22,5	9	12	2,18	7,03	7,71	
Ш12×12	12	30	12	12	5,18	8,57	10,28	0,26/0,21
Ш12×16				16	6,91	9,37		
Ш12×20				20	8,64	10,17		
Ш12×25				25	10,80	11,17		
Ш12×32				32	13,82	12,57		
Ш16×16	16	40	16	16	16,38	11,42	13,71	0,29/0,25
Ш16×20				20	20,48	12,22		
Ш16×25				25	25,60	13,22		
Ш16×32				32	32,77	14,62		
Ш16×40				40	40,96	16,22		
Ш20×20	20	50	20	20	40	14,28	17,14	0,31/0,27
Ш20×25				25	50	15,28		
Ш20×32				32	64	16,68		
Ш20×40				40	80	18,28		
Ш20×50				50	100	20,28		
Ш25×25	25	62,5	25	25	98	17,85	21,43	0,33/0,29
Ш25×32				32	125	19,25		
Ш25×40				40	156	20,83		
Ш25×50				50	195	22,85		
Ш25×64				64	250	25,65		
Ш32×32	32	80	32	32	262	22,85	27,42	0,36/0,32
Ш32×40				40	328	24,45		
Ш32×50				50	410	26,45		
Ш32×64				64	524	29,25		
Ш32×80				80	655	32,45		
Ш40×40	40	100	40	40	640	28,56	34,28	0,39/0,34
Ш40×50				50	800	30,56		
Ш40×64				64	1024	33,36		
Ш40×80				80	1280	36,56		
Ш40×100				100	1600	40,56		

Примечания: 1. В нормах геометрия пластин выдержана, но прогрессия типоразмеров 1,25 выдержана приближенно (40/1,25=32; 32/1,25=25,6; 25/1,25=20 и т.д.), поэтому с табл. 9 имеются расхождения, которые легко корректируются. 2. В табл. 9 и в П-1 не внесены размеры с уменьшенными толщинами (например, Ш20×16, Ш20×12). Для частоты 50 Гц они не рекомендуются. Применяются в основном при повышенных частотах. 3. Нормаль (при $z=1\div 2,5$) не всегда обеспечивает полное перекрытие. Иногда принимают промежуточные толщины из следующей нормали. 4. Значения k_M даны в числителе для нормального исполнения, в знаменателе — с учетом повышенной толщины изоляции по [Л. 1],

П-2. Нормаль НИО.010.005 выполнена по ряду прогрессии с знаменателем 1,2 (приближенно)

Типоразмер	Размеры, мм				Масса ¹ , кг	k_M
	d	c	h	b		
УШ10×10	10	6,5	18	6,5	0,062	0,13
УШ12×12	12	8	22	8	0,110	0,15
УШ14×14	14	9	25	9	0,170	0,17
УШ16×16	16	10	28	10	0,240	0,19
УШ19×19	19	12	33,5	12	0,410	0,21
УШ22×22	22	14	39	14	0,640	0,22
УШ26×26	26	17	47	17	1,100	0,23
УШ30×30	30	19	53	19	1,600	0,25
УШ35×35	35	22	61,5	22	2,550	0,26

Примечания: 1. Нормаль предназначена только для 50 Гц. 2. Имеет уширенное ярмо и уменьшенную ширину окна. 3. Повышенные толщины (не приведены) ($a \approx 2d$), например УШ30×35. Для УШ35×35 последующие толщины 4), 50, 63, 80. 4. Геометрия по пластинам не выдержана. 5. Коэффициент 1,2 в ряде случаев снижается до 1,15, что обеспечивает значительное перекрытие типоразмеров (пример 1).

П-3. Ленточные разрезные магнитопроводы

Тип	Номинал	Масса, кг	B^* , Т	P^{**} , Вт	P_C , Вт	B/w	S_C	$I_{x \cdot x'}$, А, при 220 В	Цена, руб.
КД-ТД-1	ПЛР25×40	2,62	1,7	200	10,68	0,316	8,61	0,35	3,20
КД-ТД-2	ПЛР18×32	1,2	1,7	100	4,7	0,185	5,43	0,18	2,20
КД-ТД-3	ПЛ16×32	0,88	1,5	60	3,8	0,182	4,54	0,132	2,20
КД-ТД-4	ШЛР16×20	0,28	1,7	20	1,1	0,092	2,7	0,0364	0,70
КД-ТД-5	ШЛ12×25	0,26	1,55	15	0,6	0,175	2,63	0,019	1,90
КД-ТД-6	ШЛ12×20	0,22	1,55	13	0,5	0,16	2,1	0,015	1,80
КД-ТД-7	ШЛ12×16	0,17	1,55	10	0,4	0,048	1,68	0,012	1,80
КД-ТД-8	ШЛ12×12,5	0,13	1,55	9	0,3	0,0375	1,31	0,009	1,70
КД-ТД-9	ШЛ10×10	0,07	1,55	4	0,16	0,023	0,86	0,007	1,60
КД-ТД-10	ШЛ6×10	0,03	1,55	1,6	0,08	0,0145	0,52	0,005	1,50

* B —рабочая индукция. ** P —ориентировочная мощность.

Примечания: 1. Для снижения потерь (д. с. в зазорах) соприкасаемые концы должны быть склеены составом на основе карбоцильного железа и эпоксидной смолы (или клея БФ-4). 2. Крепеж магнитопровода предусмотрен винтами (4—2 винта). 3. КД-ТД-4 крепится обоймой.

П-4. Соргамент размеров провода

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Масса 1 км, кг	Сопротивление 1 км, Ом	Длина 1 Ом, м	Допустимая нагрузка А, при	
					2 А/мм ²	3 А/мм ²
0,05	0,00196	0,0175	8920	0,112	0,00382	0,00598
0,06	0,00283	0,0252	6180	0,162	0,00566	0,00849
0,07	0,00385	0,0342	4540	0,220	0,00770	0,01160
0,08	0,00503	0,0448	3475	0,287	0,0101	0,0151
0,09	0,00636	0,0567	2750	0,364	0,0127	0,0191

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Масса 1 км, кг	Сопротив- ление 1 км, Ом	Длина 1 Ом, м	Допустимая нагрузка, А, при	
					2 А/мм ²	3 А/мм ²
0,10	0,00785	0,0700	2230	0,448	0,0157	0,0235
0,11	0,00950	0,0847	1850	0,541	0,0190	0,0285
0,12	0,01131	0,101	1550	0,645	0,0226	0,0339
0,13	0,01327	0,118	1320	0,757	0,0265	0,0398
0,14	0,01539	0,137	1140	0,877	0,0308	0,0462
0,15	0,01767	0,157	993	1,01	0,0353	0,0530
0,16	0,02011	0,179	873	1,15	0,0402	0,0603
0,17	0,0227	0,202	773	1,3	0,0454	0,0681
0,18	0,0255	0,227	686	1,45	0,0510	0,0765
0,19	0,0284	0,253	616	1,62	0,0568	0,0852
0,20	0,0314	0,279	557	1,79	0,0628	0,0942
0,21	0,0346	0,308	507	1,98	0,0692	0,104
0,23	0,0416	0,369	423	2,36	0,0832	0,125
0,25	0,0491	0,436	356	2,81	0,0982	0,147
0,27	0,0573	0,509	307	3,22	0,115	0,172
0,29	0,0661	0,587	265	3,77	0,133	0,198
0,31	0,0755	0,671	233	4,30	0,151	0,227
0,33	0,0855	0,760	205	4,88	0,171	0,257
0,35	0,0962	0,855	182	5,49	0,192	0,289
0,38	0,113	1,01	155	6,45	0,227	0,340
0,41	0,132	1,17	133	7,52	0,264	0,396
0,44	0,152	1,35	115	8,70	0,304	0,456
0,47	0,174	1,54	101	9,90	0,347	0,520
0,49	0,189	1,68	93,1	10,7	0,377	0,566
0,51	0,204	1,82	86,0	11,6	0,408	0,612
0,53	0,221	1,96	79,4	12,6	0,442	0,663
0,55	0,238	2,11	73,7	13,5	0,476	0,714
0,57	0,255	2,27	68,8	14,5	0,510	0,765
0,59	0,273	2,43	64,3	15,5	0,546	0,819
0,62	0,302	2,68	58,1	17,2	0,604	0,906
0,64	0,322	2,86	54,5	18,3	0,644	0,966
0,67	0,353	3,13	49,7	20,1	0,706	1,10
0,69	0,374	3,32	46,9	21,3	0,748	1,12
0,72	0,407	3,62	43,1	23,2	0,814	1,22
0,74	0,430	3,82	40,8	24,5	0,860	1,29
0,77	0,466	4,14	37,7	26,5	0,932	1,40
0,80	0,503	4,47	34,9	28,6	1,006	1,51
0,83	0,541	4,81	32,4	30,9	1,08	1,62
0,86	0,581	5,16	30,2	33,1	1,16	1,74
0,90	0,636	5,66	27,6	36,2	1,27	1,91
0,93	0,679	6,04	25,9	38,6	1,36	2,04
0,96	0,724	6,43	24,3	41,2	1,45	2,17
1,00	0,785	6,98	22,4	44,6	1,57	2,35
1,04	0,849	7,55	20,7	48,2	1,69	2,54
1,08	0,916	8,14	19,2	52,1	1,83	2,75
1,12	0,985	8,75	17,82	56,1	1,97	2,96
1,16	1,057	9,40	16,61	60,2	2,17	3,48

Диаметр провода, мм	Сечение провода, мм ²	Масса 1 км, кг	Сопротив- ление 1 км, Ом	Длина 1 Ом, м	Допустимая нагрузка, А, при	
					2 А/мм ²	3 А/мм ²
1,20	1,13	10,05	15,52	64,4	2,26	3,39
1,25	1,23	10,91	14,33	69,8	2,46	3,69
1,30	1,33	11,80	13,22	75,7	2,66	3,99
1,35	1,43	12,73	12,28	81,4	2,86	4,29
1,40	1,54	13,7	11,40	87,6	3,08	4,62
1,45	1,65	14,7	10,62	94,2	3,30	4,95
1,50	1,77	15,7	9,93	101	3,54	5,31
1,56	1,91	17,0	9,18	109	3,82	5,76
1,62	2,06	18,3	8,52	117	4,12	6,18
1,68	2,22	19,7	7,90	127	4,44	6,66
1,74	2,38	21,1	7,37	136	4,76	7,14
1,81	2,57	22,9	6,83	146	5,14	7,71
1,88	2,78	24,7	6,31	158	5,56	8,34
1,95	2,99	26,5	5,88	170	5,98	8,97
2,02	3,20	28,5	5,49	182	6,40	9,60
2,10	3,46	30,8	5,07	197	6,92	10,38
2,26	4,01	35,7	4,88	205	8,02	12,03
2,44	4,68	41,6	3,75	266	9,36	14,04

П-5. Максимальный диаметр провода в эмаль-изоляции, мм

Диаметр	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭВТЛ-1	ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ	Диаметр	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭВТЛ-1	ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭВТЛ-2, ПЭТВ
0,06	0,085	0,09	0,64	0,69	0,72
0,08	0,105	0,11	0,69	0,74	0,77
0,10	0,125	0,13	0,74	0,80	0,83
0,12	0,145	0,15	0,80	0,86	0,89
0,14	0,165	0,17	0,86	0,92	0,95
0,16	0,19	0,20	0,93	0,99	1,02
0,18	0,21	0,22	1,0	1,08	1,10
0,20	0,23	0,24	1,08	1,16	1,16
0,23	0,27	0,28	1,16	1,24	1,27
0,25	0,29	0,30	1,2	1,28	1,31
0,31	0,35	0,36	1,25	1,33	1,36
0,33	0,37	0,38	1,35	1,43	1,46
0,38	0,42	0,44	1,45	1,53	1,56
0,44	0,48	0,50	1,56	1,64	1,67
0,49	0,53	0,55	1,68	1,76	1,79
0,51	0,56	0,58	1,81	1,90	1,93
0,55	0,60	0,62	1,95	2,04	2,07
0,59	0,64	0,66	2,44	2,54	2,57

П-6. Пробивное напряжение провода, В, не менее

Диаметр провода, мм	ПЭМ-1, ПЭВ-1	ПЭМ-2, ПЭВ-2
0,06—0,07	400	500
0,08—0,09	500	700
0,10—0,14	600	800
0,15—0,20	700	900
0,21—0,41	900	1250
0,44—0,53	1000	1350
0,55—0,83	1100	1500
0,86—1,35	1300	1800
1,40—2,44	1500	2000

Примечание. Провод ПЭЛ имеет пробивное напряжение, близкое к ПЭМ-1 несколько заниженное на верхних пределах.

П-7. ЛЕНТОЧНАЯ ТЕКСТУРОВАННАЯ СТАЛЬ

В настоящее время выпускается большой ассортимент ленточной стали толщиной от 0,05 до 0,5 мм (ГОСТ 9925-61). Ленты выпускаются шириной: 5, 5,6; 6,5 7,1; 8; 9; 10; 11,2; 12; 12,5; 14; 15; 16; 18; 20; 22,4; 25; 28; 32; 35,5; 40; 50; 56; 64; 71; 80; 90; 100 мм. Стали марок Э310, Э320, Э330, Э380 выпускаются толщиной 0,5 и 0,35 мм. Стали марок Э370, Э330А и дополнительно Э380—0,35 и 0,2 мм. Стали толщиной 0,5 и 0,35 мм выпускаются при ширине ленты не менее 20 мм; толщиной 0,2 мм — при ширине ленты не менее 10 мм. Стали для повышенных частот марок Э340, Э350, Э360, Э360А выпускаются толщиной 0,05, 0,08, 0,1, 0,15 мм и дополнительно для Э340 — 0,2 мм. При этом верхний предел ширины ленты ограничен. При толщине ленты 0,05 мм ширина ленты не более 40 мм, при 0,08—0,1 мм — не более 71 мм, при 0,15—0,2 мм — не более 80 мм.

Рулоны ленточной стали выпускаются отожженными. При необходимости последующей резки или штамповки по договоренности с заводом отпускаются без отжига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальям Р. Х. Трансформаторы малой мощности. Л., Судпромгиз. 1961, 366 с.
2. Барембо К. Н., Бернштейн Л. И. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1961, 368 с.
3. Барзилович В. М. Высоковольтные трансформаторы тока. М., Госэнергоиздат, 1962, 248 с.
4. Белопольский И. И., Пикалова Л. Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М., Госэнергоиздат, 1963, 270 с.
5. Иванова М. Н. Перемотка катушек реле ИТ-80. «Энергетик», 1956, № 4, с. 21.
6. Корницкий Ю. В. Электротехнические материалы. М., Госэнергоиздат, 1968. 320 с.
7. Куликов В. А. Обеспечение надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1966. 136 с.
8. Никитский В. З. Улучшенная конфигурация листов трансформаторной стали. «Радио», 1958, № 7, с. 55—56.
9. Соболевский А. Г. Материалы в радиоэлектронике. М., Госэнергоиздат, 1963. 47 с.
10. Сорин Я. М. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. М., Госэнергоиздат, 1961. 72 с.
11. Сорин Я. М. Служба надежности. М., «Знание», 1966. 48 с.
12. Тихомиров П. И. Расчет трансформатора. М., «Энергия». 1968. 456 с.
13. Федосеев Д. Н. Технология изготовления силовых трансформаторов и дросселей. М., Госэнергоиздат, 1959. 156 с.
14. Ямаиов С. А., Сачков Д. Д. Методы защиты радиодеталей от влаги. М., Госэнергоиздат, 1951. 79 с.
15. У. Краббе и Г. Гизенхаген. Новые конструкции магнитопроводов для высокоэффективных магнитных преобразователей. — «E T Z», серия А № 19, 1957, с. 712—716.
16. TELSON WORKS GRAWLEY — «HCRallor», August 1957.

Цена 20 коп.

*Еще больше электротехнической
литературы на
www.biblio.narod.ru*